



TITLE:

製品のライフサイクルを考慮した  
最適設計の方法論( Dissertation\_全  
文)

AUTHOR(S):

土井, 健志

---

CITATION:

土井, 健志. 製品のライフサイクルを考慮した最適設計の方法論. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14941>

RIGHT:

# 製品のライフサイクルを考慮した 最適設計の方法論

2009

土 井 健 志

製品のライフサイクルを考慮した  
最適設計の方法論

2009

土 井 健 志

親愛なる家族に捧ぐ

# 目次

<b>第 1 章 緒論</b>	<b>1</b>
参考文献	4
<b>第 2 章 ライフサイクルを考慮した設計</b>	<b>5</b>
2.1 ライフサイクルエンジニアリングとライフサイクル設計	5
2.2 従来の研究	8
参考文献	13
<b>第 3 章 コンカレントエンジニアリングと設計の最適化</b>	<b>15</b>
3.1 コンカレントエンジニアリングの必要性	15
3.2 多目的最適化	17
3.2.1 多目的最適化問題	17
3.2.2 ライフサイクル設計に対する多目的最適化	19
参考文献	22
<b>第 4 章 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコスト の最適化手法</b>	<b>23</b>
4.1 緒言	23
4.2 提案する手法の概要	24
4.3 消費エネルギー可変型製品のモデル化	25
4.3.1 モデルの設定	25
4.3.2 ライフサイクルコストの定式化	27
4.4 最適化解析	28
4.4.1 解析の手法	28
4.4.2 パレート最適解の導出	31
4.5 数値計算例	32
4.5.1 計算結果	32
4.5.2 結果の考察	36
4.6 結言	38
参考文献	39

## 第5章 長期使用型製品のライフサイクルを考慮した最適システム設計手法

41

5.1 緒言	41
5.2 最適化の方法論	42
5.2.1 最適化の評価項目とその評価法	42
5.2.2 多目的最適化問題の設定とトレードオフ分析	44
5.2.3 製品の使用条件による最適解への影響	45
5.3 適用例	46
5.3.1 モデル構造と設計変数	46
5.3.2 評価項目の定式化	47
5.3.3 加工条件の設定	49
5.3.4 離散変数の設定	51
5.4 解析結果と考察	54
5.4.1 新設計法の利点の分析	54
5.4.2 離散変数の変更によるパレート解の改良	56
5.5 結言	62
参考文献	63

## 第6章 機械製品のライフサイクル設計における3Rの視点からの最適化手法

65

6.1 緒言	65
6.2 製品のライフサイクルを考慮した最適設計手法	67
6.2.1 ライフサイクル設計について	67
6.2.2 ライフサイクルの各段階と評価項目	67
6.2.3 最適化の手順	68
6.3 機械製品への適用	74
6.3.1 産業用ロボットのモデル	74
6.3.2 目的関数の定式化	74
6.3.3 最適化解析	78
6.3.4 解析結果	78
6.4 解析結果の考察	84
6.4.1 リデュース最適化の場合	84
6.4.2 リユース最適化の場合	85

6.5 結言	86
参考文献	87

## 第7章 異なるライフサイクル特性をもつ製品に対するライフサイクル設計の最適化手法 89

7.1 緒言	89
7.2 ライフサイクル設計の考え方	90
7.2.1 ライフサイクルにおける評価項目	90
7.2.2 ライフサイクルオプション	90
7.2.3 3 R 的考え方に基づく最適化	91
7.3 4 タイプの製品に対するライフサイクル設計の最適化	92
7.3.1 製品の分類と最適化の戦略	92
7.3.2 最適化の手順と定式化	95
7.4 適用モデルを用いた解析	102
7.4.1 プラスチックボトル	102
7.4.2 直交座標ロボット	105
7.4.3 4 タイプの製品に対する解析結果と考察	107
7.5 結言	118
参考文献	119

## 第8章 結論 121

## 謝辞 123

## 研究業績出版物 125

投稿 Journal 論文	125
国際会議 Proceedings (査読付)	125
国内学会発表	126





## 第1章 緒論

毎日の報道で取り扱われない日がない位、現在の社会においては地球温暖化の問題が話題になっている。この問題については、20世紀の末頃から盛んに議論がなされており、「地球環境問題は、歴史主義的な問題であると共に、すぐれた学際的な問題である。」<sup>(1)</sup>という主張がなされているように、人類にとってその存続に関わる非常に難しい問題の一つである。地球温暖化の原因については、IPPC（気候変動に関する政府間パネル）の報告にもあるように、温室効果ガスの代表である化石燃料からの二酸化炭素の排出が大きな影響をもっており、この削減が必須とされている。このため近年では、地球温暖化防止のために世界的に「低炭素社会」の実現が強く叫ばれている。2008年6月に札幌で行われた地球環境問題に関する国際環境専門者会議においては、「温暖化を緩和するためには、2050年までの二酸化炭素の排出量について、現状の50%を大幅に上回る削減が必要である」と提言している<sup>(2)</sup>。また、2008年7月に開催された北海道洞爺湖サミット（G8）において日本の福田前首相は、「低炭素社会を目指した長期目標として、2050年までに世界全体で二酸化炭素排出量の半減を目指す必要がある、日本としても2050年までの長期目標として、現状から60～80%の削減を目標に取り組んで行くこと」を表明している。

このような大幅な排出ガスの削減を実現するためには、技術的にも社会経済的にも多くの難しい問題がある。特に中国やインドのような発展途上国や新興国においては、経済発展との両立の中で先進国並みの削減目標の設定は難しいと抵抗を示している。しかしながら他方、先進国の中でもEUでは、ドイツやスペインにおけるように再生可能エネルギーの利用による「グリーン経済」への転換に向けた施策が積極的に展開されており、欧州では排出権取引も含めて低炭素社会に向けた競争が始まっている。これにより温室効果ガス削減の2020年頃の中期目標でも、欧州は高い数字を掲げている。一方日本においても、2050年における二酸化炭素排出量の半減を実現するために、福田前首相により「低炭素社会への転換」という目標が提唱され、政府としての行動計画が検討されている。これらの計画は長期的なものと中期的なものおよび短期に実行すべきものに分けられ、例えば革新技术としての二酸化炭素の回収・貯留（CCS）、既存先進技術としての原子力や太陽光などのゼロ・エミッション電源の拡大、再生可能エネルギーなどが挙げられているが、やはり大きな比重を占めるのは産業用ならびに家庭における燃料や電気などのエネルギー使用の削減すなわち省エネである。他の対策ではコストの増加や副作用が懸念されるが、エネルギーの低減は直接的に効果をもたらす対策であり、第一に実施すべき対策であるとされている。以上述べたように、地球温暖化を緩和するべく低炭素社会を目指した持続的な発展を実現するためには、ベースとして資源やエネルギーの消費を抑えた「循環型社会」の実現が重要であり、産業のベースであるモノづくりにおいては、このような視点に立って活動を行うことが強く求められる。

さて、持続可能な経済発展を実現するためには循環型社会を目指す必要があり、そこでは環境負荷の少ない、循環型の生産（モノづくり）を行うことが求められる。すなわち、大量生産・大量消費を止めて資源とエネルギーの消費を抑制し、使用済み製品はできるだけ再使用やリサイクルを行うというやり方である。このような循環型生産をより良く行うためには、そのスタートとなる製品の設計において、『ライフサイクル設計』（以下 LCD と呼ぶ）が必要である。LCD とは、製品の企画から始まり、設計、製造、輸送、使用、メンテナンス、廃棄、回収、再利用という製品のライフサイクルに亘って、各段階での製品の要求事項やその取り扱いについて設計の時点で検討しておくというものである。

LCD については、20 世紀末頃より環境調和型設計や環境適合設計などとして研究や開発が始まっており、特に近年ではライフサイクルの各段階やプロセスに焦点を当て、製品の分解やリサイクル性、メンテナンスや信頼性などの問題を設計段階で考慮する取り組み（Design for X）が増えている<sup>(3)</sup>。また持続可能な製品や循環型生産システムの構築、リユースやリサイクル設計、ライフサイクルの評価などに関する研究開発も、学会および産業界を含めこれまでに多数行われており、LCD を支援する設計手法や考え方、定量的なアプローチとしてのライフサイクルシミュレーションなどの研究が多数報告されている<sup>(4-13)</sup>。また、元来製品の設計において「コスト」は評価項目の中でも最も重要なものの一つである。LCD においても、ライフサイクルの各段階におけるコストを評価することは重要であり、それ故にライフサイクルコスト（LCC: Life Cycle Costing）なる概念があり、これに関してもこれまでに全ライフコスト（TLC: Through-Life-Costing）やライフサイクルコストとしてモデル化し、定量化する研究が数多く行われて来ている<sup>(14-18)</sup>。

ところで、製品設計においては、与えられた制約の中で製品性能や製造コストなどの要求項目をいかに最大限に実現するかという「最適化」の考え方が必要であり、これが最適設計といわれる所以である。従って LCD においても、「全てのライフサイクル段階における多くの設計変数や評価項目がある中で、どのように最適な設計を行えば良いか」ということは、非常に重要なテーマである。ところが LCD においては、製品ライフサイクルの各段階に加えて、製品の特性に応じた種々のライフサイクルオプションといった多くの設計要因があり、それに伴い評価項目も多数存在する。このような設計環境の中で最適な設計を行うためには、コンカレントエンジニアリング的な見方が必要である。また、評価項目の中には互いに競合する関係にあるものも存在するため、多目的最適化のアプローチが必要となる。さらに多目的最適化を進める場合には、その問題の構造をよく分析・把握し、設計変数と評価項目および評価項目間の関係を吟味してそのトレードオフ関係を明確化した上で、評価項目の重要度や優先性を考えて最適化問題を構築する必要がある。

このように、LCD を最適に実施するためには、対象とする設計問題における評価項目をどのような基準や順序により取り扱い、与えられた制約条件において最適な解を得るかについての方法が問題となる。換言すれば、製品のライフサイクルに関わる評価項目をコンカレントに考慮した最適設計のための支援手法が必要である。特に設計者にとっては、LCD

を最適に遂行するための定量的な意思決定を支援してくれるような設計支援システムや手法が要望される。しかしながら、これまでのライフサイクル設計に関する研究においては、ライフサイクルに関わる評価特性を最適化するという観点から定量的な解析を行ったものはあまり多くないと考えられる。

以上のような背景を鑑みて、本研究では、数種のライフサイクル特性が異なる製品を設計対象に選び、数値解析のためのモデル化を行うことにより、これらを用いてライフサイクル設計における定量的な意思決定を支援できるような「最適設計の方法論」を提案することを目的とした。

本論文は八章で構成され、次章以降の内容は以下の通りである。

**第2章 ライフサイクルを考慮した設計**では、ライフサイクルエンジニアリングとライフサイクル設計について概要を述べるとともに、この分野における従来の研究について説明する。

**第3章 コンカレントエンジニアリングと設計の最適化**では、設計の最適化におけるコンカレントエンジニアリングの重要性および必要性を概説するとともに、多目的最適化問題の概要とライフサイクル設計に対する多目的最適化の適用についての考え方を述べる。

**第4章 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコストの最適化手法**では、家電製品のような省エネルギーが重要な製品を想定して、製造コストと使用コスト、メンテナンスコストを考慮する中でトータルのライフサイクルコストを最小化するための方法論を述べる。

**第5章 長期使用型製品のライフサイクルを考慮した最適システム設計手法**では、製品の使用段階における運転エネルギーの比重が大きい工作機械を対象にして、製品性能とライフサイクルコストおよび環境影響を評価項目としたライフサイクル設計に対する最適設計法を示し、さらに離散変数の変更による最適設計解の改良について言及する。

**第6章 機械製品のライフサイクル設計における3Rの視点からの最適化手法**では、環境問題で重要な3Rの視点から、リデュースとリユースを主目的とする2つの最適化の戦略を提案する。そしてそれぞれのパターンに対する最適化問題の構築と、適用例を通じたパレート最適解の特徴等について説明し、ライフサイクルコストを考慮する中で製品性能を決定する最適化手法の有用性について述べる。

**第7章 異なるライフサイクル特性をもつ製品に対するライフサイクル設計の最適化手法**では、ライフサイクル特性において重要な項目である製品の「機能寿命」と「使用期間」の長短により製品を4つのタイプに分類して、それらのライフサイクルシナリオを設定し、ライフサイクル設計の最適化を行う方法を示す。適用例として、「プラスチックボトル」と「工業用ロボットモデル」を選び、多目的問題としての具体的な最適設計解を求めることにより、各タイプの特徴を議論する。

**第8章 結論**では、本研究により得られた成果についてまとめる。

## 参考文献

- (1) 佐和隆光, 地球温暖化を防ぐ (-20 世紀型経済システムの転換-) , (1997), p.6, 岩波新書.
- (2) 2008 年 6 月 27 日付の朝日新聞記事より.
- (3) Kuo,T.C., Huang,S.H. and Zhang,H.C., Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41, (2001), pp.241-260.
- (4) Maxwell,D., van der Vorst,R., Developing sustainable products and services, *Journal of Cleaner Production*, 11, (2003), pp.883-895.
- (5) 近藤伸亮, 循環型生産システム構築のための課題, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.401-406.
- (6) 木村文彦, 環境に配慮した生産システム構築の考え方, 精密工学会誌, Vol.71, No.8(2005), pp.941-945.
- (7) 渡辺 富夫, 複写機の部品再利用戦略, 日本機械学会誌, Vol.109, No.1055(2006), pp.833-836.
- (8) 増井慶次郎, 石井浩介, 海外でのリサイクル設計, 精密工学会誌, Vol.64, No.4(1998), pp.522-525.
- (9) 上野 潔, 家電リサイクルの高度化, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.437-441.
- (10) 鄭暎道, 加藤 悟, 木村文彦, ライフサイクル評価を用いたモジュラー設計手法, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, B74, pp.159-160.
- (11) 高田祥三, 製品ライフサイクルのシミュレーション, 計測と制御, Vol.43, No.5 (2004), pp.395-400.
- (12) 田中将貴, 小野里雅彦, 寺本孝司, 竹内芳美, 消費者と生産者の行動選好を考慮したライフサイクルシミュレーション, 精密工学会誌, Vol.72, No.2(2006), pp.271-275.
- (13) 則竹茂年, 中野 冠, 木村文彦, 生産システムのライフサイクル評価シミュレータに関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.724 (2006), pp.3955-3961.
- (14) Asiedu,Y., Gu,P. Product life cycle cost analysis: state of the art review, *International Journal of Production Research*, Vol.36, No.4(1998), pp.883-908.
- (15) 伊坪徳宏, ライフサイクルを指向した環境経営管理手法ーLCA から LCC, LCM へー, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.407-414.
- (16) Xu, X., Chen, J. L. -Q. and Xie, S. Q., Framework of a Product Lifecycle Costing System, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.6, (2006), pp.69-77.
- (17) Takai,S., "A Lifecycle-Cost Model of Concept Testing," *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99605(2006).
- (18) Cheung,W.M., Newnes, L.B., Mileham,A.R., Marsh,R. and Lanham,J.D., A study of Life Cycle Costing in the Perspectives of Research and Commercial Application in the 21<sup>st</sup> Century, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2007-34425(2007).

## 第2章 ライフサイクルを考慮した設計

### 2.1 ライフサイクルエンジニアリングとライフサイクル設計

循環型生産を安定して行うためには、さまざまなライフサイクルオプション（製品のライフサイクルで取り得る選択肢の意味で、広い意味での循環経路のこと）を組み合わせることで安定した製品の循環を実現することが必要であり、このためには製品のライフサイクルそのものを設計することが大変重要となる。言い換えれば、ライフサイクル設計を行うメーカーは、製品の特性や循環方法などに関する基本情報をすべて決定、生成することができるということである。循環型生産の実現にかかわる問題を取り扱う技術体系は、「ライフサイクルエンジニアリング」と称されている<sup>(1)</sup>。これは製品のライフサイクルを俯瞰的に捉え、設計、生産、流通、使用、回収、廃棄、再生などの段階を全て考慮して、資源消費を抑え、環境負荷を少なく、かつ製品の価値を高めるためにはいかにすればよいかを研究する学問分野であり、特に使用段階以降の回収、分解・解体、再使用、廃棄、再生などのステージを物量の移動を含めて取り扱うという点に特徴がある<sup>(2)</sup>。

ライフサイクルエンジニアリングの中でも、重要な役割を担うものが「ライフサイクル設計」である。吉川によれば<sup>(2)</sup>、ライフサイクルデザインは、持続可能な開発を実現するための設計科学の分野における問題提起であり、持続可能な社会を作ろうとする流れを牽引する強力な考え方である。工業製品というものは環境に影響を与える重要な因子の一つであり、環境負荷を極小化する製品を求めることは正しい方向である。ライフサイクルという言葉は、もともとは生物学の言葉である。つまり、生物は子を生むことによって「同じことが繰り返される」からサイクル（周期）なのである。従来の工業製品は、完成から廃棄までの一生、すなわちライフはあったが、サイクルが何を意味するかは必ずしも判然とはしていなかった。工業製品にライフサイクルがなかったのを、循環型社会の中の工業製品として環境に適合していくために、生命体のようなサイクルを新しく設定すべきだという、目標としての理念的定義であると言える。

さらに、ある特定の製品についてその歴史の中の1つの周期を切り出してみる、すなわちライフサイクルを見ることによってその製品を理解しようとするのは過去になかった視点である。1つの周期を見るという新しい視点は、その製品の作り方や機能だけでなく、その出現が社会に何をもたらし環境にどのような負荷を与えるかをも明らかにするものである。この製品の1周期を見るという行為には、従来にない「固有の俯瞰的視点」が必要と言われている。このように、ライフサイクルエンジニアリングでは、製品のライフサイクル全体の視点から設計し、マネジメントし、評価することの重要性が広く指摘されている。ライフサイクルアセスメント(LCA)と呼ばれている活動もこのような視点である。

さて、ライフサイクル設計とは、インバース・マニュファクチャリング（逆生産と呼ばれる、製品の回収から再生へのプロセスのことを意味する）を実現するように製品の一生を

設計することである。言い換えれば、インバース・マニュファクチャリングを実現するライフサイクル設計とは、現状では個別の行動原理で実施されている製品設計、製造、使用、リサイクル、廃棄などの個々のプロセスを有機的に結合し、製品ライフサイクル全体をシステム化する計画図を作成することに相当する。そしてこのためには、循環を前提として、下記の4項目を統合的に設計することが必要であると言われている<sup>(3)</sup>。

- ①ビジネス設計 … 製品主体の大量生産形態を抜本的に考え直すビジネスの設計
- ②ライフサイクル戦略の策定 … ライフサイクルオプションのベストミックスの決定
- ③製品設計 … 新製品・新部品の生産をできるだけ抑制するようリデュース設計
- ④プロセス設計 … ①，②を達成するようにライフサイクル・プロセスを適切に設計

ライフサイクル設計における基本的な視点は、これまでの設計・製造側主体の「品質の高いものをいかに効率よく低コストで作るか」や、廃棄・再生側主体の「排出されたものをいかに安全に無駄なく処理できるか」というような限られた要素技術的視点から脱却して、「いかに作らないで（資源・エネルギーを消費しないで）、要求されるサービスを満足させかつ利益を確保するか」という考え方に置かれている。例えば、これまで広く実践されてきた環境調和型設計は、使用時の省エネルギー設計、有害物質の不使用、あるいはマテリアルリサイクルのための設計（分解性設計やリサイクル容易な材料の選択など）が主体である。これらは、製品ライフサイクルの一部のプロセスに注目し、その性能の改善を目的とした設計であり、ライフサイクル設計として有力な手段ではあるが、既存製品の改善が主体であり、ビジネスの変革、脱物質化を伴う抜本的な設計、製品ライフサイクル全体から見た適切なライフサイクルオプションの組合せの選択という視点が弱いものである。

ライフサイクル設計で最も重要なことは、設計の上流段階で対象とする製品のライフサイクル特性に最適なビジネス戦略とライフサイクル戦略を決定することである。そのためには、製品のライフサイクル特性を十分に把握した上で、ライフサイクルオプションのベストミックスを行うことが重要であるとされている<sup>(3)</sup>。

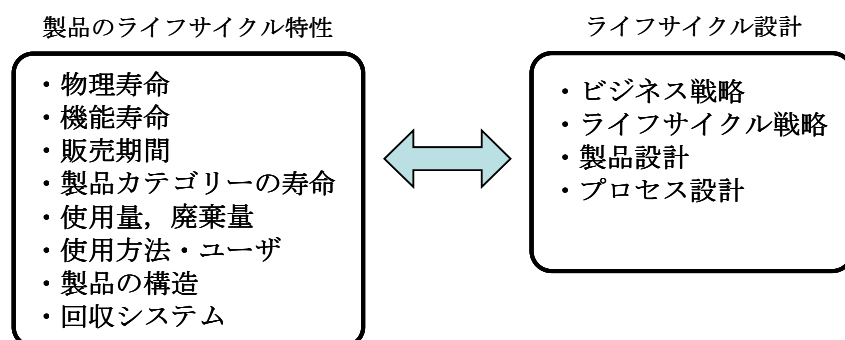


図 2-1 ライフサイクル設計の基本課題

このライフサイクル設計の基本課題を示したものが、図 2-1 である。すなわちこの図に示すように、対象とする製品のライフサイクル特性を十分に把握し、ビジネス戦略やライフサイクル戦略の策定、製品設計、プロセス設計を統合的に行うことが必要である。図 2-1 の製品ライフサイクル特性の中で、製品の寿命（物理寿命、機能寿命）は重要である。ここで物理寿命とは、従来の意味で製品が故障するあるいは劣化するまでの期間であり、耐用寿命とも呼ばれる。一方、機能寿命とは、製品自体は正常に作動するのに、機能が大幅に劣るあるいはデザインが古くなったために捨てられてしまうという意味での寿命であり、価値寿命とも呼ばれる。現在の組立型製品の多くは、パソコンや携帯電話に見られるように、機能寿命が支配的になっている場合が多い。循環型生産をより良く行うためには、機能寿命の維持、向上を図るとともに、物理寿命まで製品や部品を使いきるためにはいかにすべきかを考えなければならない。

また一方、国連環境計画（UNEP）における持続可能な製品開発に関する作業部会の座長であったハンス・ヴァン・ヴェーネンらは、ライフサイクル全体を考慮した製品の開発と設計のためのマニュアルとして、『ライフサイクルデザイン』を著しているが、その中でエコデザインを実施するための方針と設計基準として、次のような 13 の環境原則を提案している<sup>(4)</sup>。これらは実際の設計に当たり、十分に考慮に入れるべき基準である。

- |       |                               |
|-------|-------------------------------|
| 原則 1  | 環境効率と最適な機能を実現する。              |
| 原則 2  | 資源を節約する。                      |
| 原則 3  | 再生可能でかつ十分にある資源を使用する。          |
| 原則 4  | 製品の耐久性を高める。                   |
| 原則 5  | 製品の再利用のための設計を行う。              |
| 原則 6  | 素材のリサイクルのための設計を行う。            |
| 原則 7  | 解体のための設計を行う。                  |
| 原則 8  | 有害物質（の利用・発生）を最小限にする。          |
| 原則 9  | 環境にやさしい生産を行う。                 |
| 原則 10 | 使用中の製品が環境に及ぼす影響を最小化する。        |
| 原則 11 | 環境にやさしい容器・包装を使用する。            |
| 原則 12 | リサイクルできない素材については環境にやさしい処分を行う。 |
| 原則 13 | 環境にやさしい配送・回収を実行する。            |

以上、ライフサイクル設計について基本的な事項を述べてきたが、ライフサイクル設計において重要なことは、分解性やリサイクル性を考慮した製品設計や使用、メンテナンス、回収などのプロセス設計のような要素設計に入る前に、その製品のライフサイクル特性を十分に踏まえたビジネス戦略やライフサイクル戦略を、設計の上流段階で明確に決めておくということであり、これがライフサイクル設計のポイントである。

## 2.2 従来の研究

ライフサイクル設計に関する最近の研究について、主として 2000 年以降のものを対象にその要点を紹介する。

### (1) ライフサイクルエンジニアリングおよびライフサイクル設計の考え方について

高田らは、循環型生産の実現に向けて、製品や設備の特性に応じたライフサイクル戦略の考え方を示し、それを可能にするためのライフサイクルエンジニアリングの研究課題を整理している<sup>(5)</sup>。また梅田は、循環型社会を構築するためのモノづくりの有力な手段として、「ライフサイクルエンジニアリング」を提唱している<sup>(4)</sup>。これは、「製品ライフサイクル」を俯瞰的に捉え、設計、生産・逆生産を管理する活動のための技術体系である。本論文で梅田は、ライフサイクルエンジニアリングの必要性と、基本的な考え方および核となる技術課題をまとめ、その技術課題の中心である「ライフサイクル設計」の基本的な考え方を説明している。

一方米国では、J. Gershenson らが、モジュール設計の考え方をライフサイクル設計に取り入れてその有効性を論じている<sup>(6)</sup>。この研究では、製品の形状あるいは機能の構造のみならず、製造、分解、使用およびリサイクルのようなライフサイクル段階に基づいて、モジュール性の能力を具現化させるというモジュール性についての定義を用いている。そして、モジュール性を促進し、ライフサイクル段階の変更による継続的な製品設計変更を防止し、かつライフサイクル段階の変更に対する速やかな対応を支援する相対的なモジュール性の尺度とモジュール設計の方法論を展開している。また T.C. Kuo らは、製造における Design for X (DFX) について、その概念、応用および今後の展望を示し、将来の研究やその実行に対する指針を提供している<sup>(7)</sup>。そして最近は環境問題に対する関心から、分解やリサイクルの問題を設計段階で考慮するべきという要求が強くなっており、研究者の関心は、環境のための設計、リサイクル可能性のための設計、ライフサイクルのための設計 (DFLC) に集中してきていると述べている。

### (2) ライフサイクル戦略に関する研究

高田らも製品や設備の特性に応じたライフサイクル戦略の考え方を示しているが<sup>(5)</sup>、Y.Ogushi らは、ライフサイクル結果 (lifecycle outcome) に対して、製品設計やシステム設計およびそれらの支援技術のような技術的要因に加えて、ビジネス戦略、法規制、消費者行動および市場動向のような外的な非技術的要因がどのような影響を及ぼすかを研究している<sup>(8)</sup>。すなわち、日本の市場における 5 つの製品群（コピー機、家電製品、使い捨てカメラ、パソコンおよび自動車）の事例研究において、主要なライフサイクルオプションと各ライフサイクル戦略を達成するために必要な条件を整理し、卓越したライフサイクル結果を得るためには、製品設計において管理的な行動 (management practices) の実施がいかに重要であるかを示している。

また増井らは、ライフサイクル要因である「製品寿命」と「技術革新周期」に注目し、



これら 2 つの因子によって種々の製品を特徴が類似した製品領域に分類した．そして各製品領域に対してライフサイクル戦略を設定するとともに，品質機能展開（QFD）を応用して各ライフサイクル戦略を初期段階の製品設計に反映させるための手法（支援ツール）を提案している<sup>(9)</sup>．

### (3) 設計支援ツールの研究

ライフサイクル設計のための支援ツールについては，増井らの QFD を応用した手法のことは(2)で述べたが，小林は，大量生産される工業製品を対象としたライフサイクル設計に対する独自の支援手法：Life Cycle Planning を提案している．この手法は，製品に対する顧客要求と環境要求を両立させる目標仕様を設定し，具体的な環境調和型設計コンセプトを決定することを目的とするもので，製品開発の上流段階で品質，コスト，環境側面を総合し，部品レベルで適切な資源循環のあり方（ライフサイクルオプション）を決定するのに有効な方法である．ライフサイクルオプションとしては，特にアップグレード，メンテナンス，リユース，リサイクルに注目している．開発した設計支援ツールは LC Planner と呼び，家庭用のコードレス・クリーナーにこれを適用した例を紹介している<sup>(10)</sup>．

また，製品ライフサイクルの評価のためのツールとして考えられるライフサイクルシミュレーションに関して，高田は，循環型生産を実現していくためのライフサイクルエンジニアリングの重要性は広く認識されて来ているが，循環型生産システムを実現していくための方法論については未だ確立しておらず多くの課題があるとしている．そこで，製品ライフサイクルの評価に関する課題に焦点を当て，その解決のためのツールとしてのライフサイクルシミュレーションについて，開発したシミュレーションシステムとその適用例を紹介している．例えば携帯電話の部品リユースについては，製品寿命と部品寿命の組合せにより，ライフサイクル全体の評価指標（CO<sub>2</sub> 排出量やリユース部品使用率）が複雑に変化することを示し，ライフサイクルシミュレーションの有効性を説明している<sup>(11)</sup>．

### (4) 経営性と環境性の関係に関する研究

また，ライフサイクル設計の評価項目には競合関係になっているものがあり，特に製造コストと環境への影響の関係はトレードオフになる場合が多い．このようなモノづくりにおける経営性と環境性の関係については，次のような研究がある．E.Raizer Neto らは，持続性の評価指標として，電力消費や水，材料バランスに関するものなど製造に関わる 25 の指標を提案している<sup>(12)</sup>．D.A. Bradley らは，部品設計を遂行するために必要な製造過程におけるコストと環境的な性能を見積るために，設計の意思決定支援モデルを開発している<sup>(13)</sup>．運転や機械類に関係した設計パラメーターの不確実性は，確率密度関数によって把握され，モンテカルロシミュレーションの結果により，モデルの出力の不確実性と次の意思決定に伴うリスクを洞察することができるとしている．また M. Bevilacqua らは，DFE (Design for Environment) に LCA を組み込んだ新しい設計法を提案し，DFE と LCA の技術

を新製品の開発と一連の既存製品の再設計プロセスの両方に対して統合するような方法論を展開している<sup>(14)</sup>.

#### (5) ライフサイクルモデル, ライフサイクルコストの研究

ライフサイクル設計において, ライフサイクルコストの評価は最も重要な課題の一つであり, これに関しても色々なモデルやシミュレーションの手法が提案されている.

まず, 構想設計において設計者によるライフサイクルコストの容易な評価を支援するために, K.-K. Seo らは, Artificial Neural Networks を用いたライフサイクルコストの予測手法を提案している<sup>(15)</sup>. 製品の全ライフサイクルコストの 70%以上が初期設計の段階に委ねられているので, 設計者は, この段階における意思決定にライフサイクル要因を含めて考えることによって, 製品のライフサイクルコストを十分減らすことが出来る. この研究は, 予備的なライフサイクルコストを提供することができる近似的な手法を求めている. 既存製品に関する既知の特質を使用するように教え込まれた学習アルゴリズムによって, 新たな LCC モデルを定義するための経費をかけずに, 新製品のライフサイクルコストを構想設計段階において短時間で近似することが可能となっている. 人工の神経ネットワークは, 製品特性と以前に存在する LCC 研究からのライフサイクルコストデータを一般化するように教え込まれたものであり, 学習 LCC アプローチとその適用例が示されている.

また M. Sandberg らは, 機能 (トータルケアが必要な) 製品であるジェットエンジン部品の構想開発におけるライフサイクルコストを見積もる手法を提案している<sup>(16)</sup>. この研究の焦点は, 概念設計の評価の中に製造と製造以降の活動の評価を導入することであり, この目的のため, ジェットエンジンの構造部品を開発する場合のチーム間の情報の流れを取り扱うモデルを提案した. そしてそのモデルが, ジェットエンジン部品製造者との協調作業の中で用いられた適用例を示している. この研究の大きな貢献は設計支援であり, 構想設計における多くの設計, 性能, 製造およびメンテナンスの活動間の意思決定が, お互いに相手に対してどのような影響を与えるかを評価するために用いることができるものである. 設計者達は, 設計変更によるライフサイクルコストの変化を一緒に査定することができる. この設計支援モデルは, より広いライフサイクルの観点から見通すことができるため, 機能製品のハードウェア部品 (HFP) の開発にとってより適したものであるとしている. 他方 X. Xu らは, 特に製品のライフサイクルの初期段階での意思決定を支援するための製品ライフサイクルのコスト算定システム(PLCS)の枠組みを与えており, それは新製品開発を助ける設計支援ツールとして使用することができる<sup>(17)</sup>.

ライフサイクルコストに関する研究としては, W.M. Cheung らが 2000 年以降の関連する学術研究に焦点を当ててライフサイクルコストニングの分野の研究を概観するとともに, 現在の商用のコスト評価システムの比較と批評を行っている<sup>(18)</sup>. そして概観での知見と産業界の調査結果を用いて, 設計と製造コストに対する数式表現と重要な因子の導入を提案している. ここでは, 複雑な製品のライフサイクルコストの評価手法とするために, これ

らの数式表現は、操業、メンテナンス、廃棄のコストを考慮している。この手法は、英国防衛省における小型・長寿命の電子製品の分野で最近に行われた研究において、具体的に適用されている。

#### (6) ライフサイクルアセスメント (LCA) などに関する研究

LCA とは環境影響評価ツールであるが、LCA の現状と問題点をまとめたものとしては、例えば、伊坪の報告がある<sup>(19)</sup>。ここには、Eco-indicator 99 などの被害算定型の主な LCIA (Life Cycle Impact Assessment) 手法が示されている。また、LCA の分野では新領域であるが、経済指標を提示するための有用なツールとして、LCC (Life Cycle Costing) の紹介もなされている。LCC の実施が積極的に行われているのは、建築・土木、信頼性工学、石油産業の 3 領域である。信頼性工学においては、製品の信頼性向上と生産費用はトレードオフの関係にあり、これら双方の効果を考慮した最適解を得ることが必要であり、そのためのツールとして LCC が利用される。また、當麻らは LCA を生産加工工程（機械加工で多用されている旋削加工）に適用し、従来までの油剤加工と環境対応加工である MQL 加工、冷風加工が環境に与える影響の比較評価を行っている<sup>(20)</sup>。評価環境負荷因子を、電力消費や油剤または他の資源の使用により排出される二酸化炭素として計算した結果、環境対応加工により 30% の二酸化炭素の排出量削減ができることを示している。

#### (7) ライフサイクルデザインの最適化に関する研究

最後に、ライフサイクルデザインにおける最適化を取り上げた研究について見てみる。少し以前になるが吉村は、ライフサイクルを考慮した設計の最適化について、その手順を提案している<sup>(21)</sup>。すなわち、先ず製品のライフサイクル段階及びそこで評価すべき特性を明確にし、次にそれぞれの評価特性の間の関係を明確にする。そして問題を定式化した後、これらをコンカレントに最適化することにより設計解を得るというものである。また吉村らはさらに、ライフサイクルデザインに限らず、特に多くの変数が存在する複雑な問題の最適化に当たっては、先ずその問題を単純化して段階的に取り扱うという多層最適化設計手法の有効性を提唱している<sup>(22)</sup>。

最近の研究としては、例えば、P. Erol と J. Thoming は、プロセス溶液の回生が可能なプロセスについて、経済的な負荷と環境面の負荷の両方の最小化をリユースとリサイクルのネットワーク (RRN) のエコ最適設計によって実現することを目的として、金属表面の仕上げ工程に対して RRN を統合する手順を研究している<sup>(23)</sup>。そして、環境負荷感度の同時解析が、多目的最適化と結合されて、整数混合型非線形プログラミング (MINLP) によって遂行されている。これは、“eco-eco”トレードオフを許容し、全体の年間コストと環境負荷が同時に最小化されている。また M. Fragiadakis らは、地震荷重を受ける鋼構造物のパフォーマンススペースの最適設計に関して、初期構造コストの目的関数に対して、地震による損失をライフサイクルコストとして付加的な目的関数に選んで、多目的最適化問題とし

て取り扱う新しい方法論を提案している<sup>(24)</sup>。そして多目的最適化問題の解法については、EA（進化論的アルゴリズム）と問題の特質に合うように特別に作られたアルゴリズムが使用されている。また、S. Takeuchi と K. Saitou は、埋め込み型の分解方式をもつ製品の設計に対して、リサイクルとリユースによる利益が最大で、かつ環境負荷が最小になるような分解が出来るように、部品と位置決め器および締結器の空間配置と、部品とサブアセンブリの寿命末期（EOL）の取扱いを同時に決定する最適化手法を提案している<sup>(25)</sup>。さらに S. Takai は、新製品開発における構想設計に関して、「構想試験」のために開発するプロトタイプ of 最適数を見つけるために、学習有りと無しの場合のライフサイクルコストモデルを提案している。そしてこのモデルを用いた解析により、プロトタイプ of 最適数に対するライフサイクルステージのコストや技術者の経験、および学習能力の影響を調べている<sup>(26)</sup>。

以上、従来の研究を内容別に整理して概説したが、これらの知見は、第4章以降の研究におけるベースとなっている。

## 参考文献

- (1) 梅田 靖, ライフサイクルエンジニアリングの基本的な考え方, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.388-394.
- (2) 吉川弘之, ライフサイクルデザインの意義, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.383-387.
- (3) インバース・マニファクチャリングフォーラム監修、木村文彦ほか編, インバース・マニファクチャリング ハンドブック, (2004), p.69, 丸善.
- (4) 山本良一監訳, 深沢 篤訳, ライフサイクルデザイン, (1999), p.90, カタログハウス.
- (5) 高田祥三, 梅田 靖, 加藤 悟, ライフサイクルデザインへのロードマップ, 精密工学会誌, Vol.66, No.12(2000), pp.1853-1857.
- (6) John K. Gershenson, G. Jagannath Prasad, and Srikanth Allamneni, Modular Product Design: A Life-cycle View, *Journal of Integrated Design and Process Science*, Vol.3, No.4(1999).
- (7) Kuo,T.C., Huang,S.H. and Zhang,H.C., Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41(2001), pp.241-260.
- (8) Ogushi,Y., Kandlikar,M. and Dowlatabadi,H., Assessing product life cycle strategies in the Japanese market, *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, (2006), pp.49-64, Springer.
- (9) 増井慶次郎, Catherine M.Rose, 水原清司, 石井浩介, ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, 精密工学会誌, Vol.66, No.4(2000), pp.567-571.
- (10) 小林英樹, 企業におけるライフサイクル設計支援, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.425-428.
- (11) 高田祥三, 製品ライフサイクルのシミュレーション, 計測と制御, Vol.43, No.5 (2004), pp.395-400.
- (12) Raizer Neto,E., Mariotto,M.T. and Hinz,R.T.P., Indicator to measure sustainability of an industrial manufacturing, *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development* (2006), pp.111-122, Springer.
- (13) Bradley,D.A., *et al.*, A Design Decision Support Model for Estimating Environmental Impacts and Costs in Manufacturing, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99045(2006).
- (14) Bevilacqua,M., *et al.*, Development of a sustainable product lifecycle in manufacturing firms, *International Journal of Production Research*, Vol.45, No.18-19(2007), pp.4073-4098.
- (15) K.-K. Seo, *et al.*, Approximate Estimation of the Product Life Cycle Cost Using Artificial Neural Networks in Conceptual Design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, (2002), pp.461-471.
- (16) Sandberg,M., Boart,P. and Larsson,T., Functional Product Life-cycle Simulation Model for Cost Estimation in Conceptual Design of Jet Engine Components, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, **13**(4), (2005), pp.331-342.

- (17) Xu,X., Chen,J.L.-Q. and Xie,S.Q., Framework of a Product Lifecycle Costing System, *ASME J. of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.6, March 2006, pp.69-77.
- (18) Cheung,W.M., Newnes, L.B., Mileham,A.R., Marsh,R. and Lanham,J.D., A study of Life Cycle Costing in the Perspectives of Research and Commercial Application in the 21<sup>st</sup> Century, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2007-34425(2007).
- (19) 伊坪徳宏, ライフサイクルを指向した環境経営管理手法—LCA から LCC, LCM へ—, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.407-414.
- (20) 當麻昭次郎, 大森茂俊, 小久保邦雄, 立野昌義, LCA 手法を用いた環境対応加工の環境負荷評価, 精密工学会誌, Vol.69, No.6(2003), pp.825-830.
- (21) Yoshimura,M., Design Optimisation for Product Life Cycle, *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives* (Edited by G.Q.Huang), (1996), pp.424-427, Chapman & Hall.
- (22) 吉村允孝, 濱田年男, 由良憲二, 野池清文, 人見勝人, 機械構造システムの多層最適設計 (単純化構造を媒体とした振動特性に関する最適化と具体設計の探索), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.50, No.452(1984), pp.724-732.
- (23) Erol,P., Thoming,J., ECO-design of reuse and recycling networks by multi-objective optimization, *J. of Cleaner Production*, 13, (2005), pp.1492-1503.
- (24) Fragiadakis, M., Lagaros, N.D. and Papadrakakis, M., Performance-based multiobjective optimum design of steel structures considering life-cycle cost, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.32, No.1(2006), pp.1-11.
- (25) Takeuchi,S., Saitou,K., Design for Optimal End-Of-Life Scenario via Product-Embedded Disassembly, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99475(2006).
- (26) Takai,S., A Lifecycle-Cost Model of Concept Testing, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99605(2006).

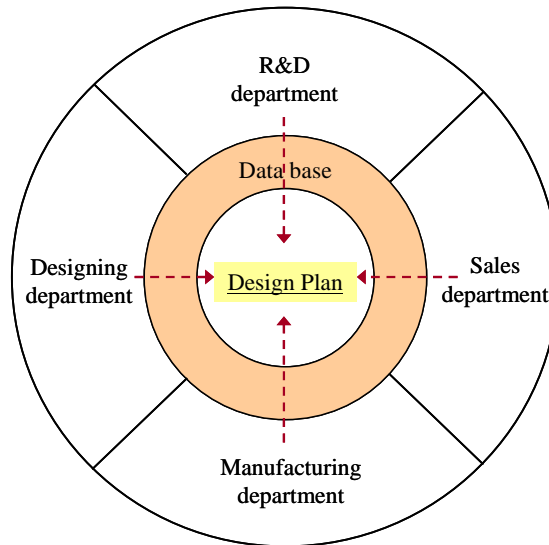
## 第3章 コンカレントエンジニアリングと設計の最適化

### 3.1 コンカレントエンジニアリングの必要性

今、モノづくりということで、製品を開発、製造、販売する企業を考えると、製品の企画、研究開発、設計、生産、販売などの業務は、それぞれの部門に分かれて行われるが、組織が大きくなれば部門間のコミュニケーションが悪くなるため、より良い性能の製品をより安く作ることが難しくなる。従来から日本の企業においては、新製品の開発などに当たっては、開発、設計、製造、販売、管理などの各部門の担当者が集まってチームを結成し、協議を行うということがよく行われていたが、この場合はコンピュータの支援のもとでそれを行おうとしていた訳ではなかった。一方欧米では、部門間の人的な交流が希薄なこともあり、コンピュータの支援のもとでこのような活動をさらに有効にかつ総合的に行うことを目指して、コンカレントエンジニアリング (Concurrent Engineering) という言葉が、1980年代の終わり頃アメリカで生まれた。すなわち、組織の各部門の代表者が集まり、設計案その他について協議して意思決定しようとするのがその発想にあり、このことをコンピュータの支援のもとで、効率良く行おうとすることが、コンカレントエンジニアリング (サイマルテニアスエンジニアリング: Simultaneous Engineering と呼ばれる) の目標である。ここでは、一方向的な流れではなく、同時的または並列的な流れに従って製品の設計や生産に対する意思決定を協調的に行なおうとし、これによって部門間での競合事項の解消や意思疎通の改善を図ることができる<sup>(1)</sup>。

コンカレントエンジニアリングは、生産活動の上流である製品設計において、工程としては下流に位置する事項を製品設計と同時的に決定しようとするものであり、英語では“Design for X”という表現もなされ、“X”のところに対応する要因が入り、何に焦点を当てたコンカレント的な意思決定であるかを表している。例えば、Xに製品のライフサイクルに関わる要因すなわち、manufacture, disassembly, recyclability, maintainability, reliability などが入る。またライフサイクル全体に着目した design for environment や design for life-cycle という用語も用いられている<sup>(2)</sup>。ライフサイクル設計は、設計の時点で製品のライフサイクルの全ての段階を考慮するものであるが、これはライフサイクルの全ての段階における製品要求事項やコストなどを、製品の設計段階で同時かつ並列的に扱うことを意味しており、正にコンカレントエンジニアリングの代表的な対象であると言える。

コンカレントエンジニアリングは、図 3-1 にその概念を図示したように、コンピュータの支援のもとで、組織や部門間で生じる競合事項などを製品の詳細が決定される前に解消しようとするものである。その意思決定のためには、非常に多くの要因を考慮する必要がある。大規模な意思決定問題を解かなければならない。これは、何らかの評価基準のもとで最良の解を決定する“最適化問題”であると考えられる。



**Fig. 3-1** Conceptual diagram of concurrent engineering

コンカレントエンジニアリングのメリットとしては，開発時間の短縮や広い実行可能領域からのより望ましい解の獲得，さらにはシナジー効果（相乗効果）によりブレイクスルー解を生み出す可能性が挙げられる．これらの実行を積極的に支援するためには，最適化の手法や意思決定の手法が重要であり，コンカレントエンジニアリングの概念に基づいた最適化は，“コンカレント最適化（Concurrent Optimization）”と呼ばれている<sup>(3)</sup>．コンカレント最適化は，一面的な目的ではなく，総合的な観点から最良のものを得るための意思決定をベースにした最適化の枠組みである．より良い解を得る上での一つの原理といえるものが，コンカレント最適化あるいはコンカレント意思決定であり，部分的な最適化ではなく全体としての最適化を目指すものである．

コンカレントエンジニアリングは，製品の設計や生産の分野で主に用いられる工学的なコンセプトであるが，これは一般の最適化問題や意思決定問題におけるより良い解を探索する上で普遍的に用いることができるものであり，最適化戦略における最も重要なものの一つであるとされている<sup>(4)</sup>．このようにコンカレント最適化は多くの最適化問題に適用される考え方であるが，ライフサイクル設計の問題はその主要な一つである．すなわち，製品を市場に出した後の，ユーザーでの製品の使用，メンテナンス，廃棄，再利用，および環境への影響などを設計段階で考慮して，製品性能，品質，コストなどとコンカレントに最適化する必要があるからである．本研究では，このようなコンカレントエンジニアリングの考え方に立って最適化問題の構築や解析を進めることにする．



## 3.2 多目的最適化

既述したように、ライフサイクル設計の問題は、多くの評価項目がある中で、設計の初期段階でそれらをコンカレントに考慮して最適な解を得なければならない最適化問題である。そして、通常はそれらの評価項目の中には、競合関係（トレードオフ関係）にあるものがあるため、多目的の最適化問題となる。以下では、多目的最適化問題について、その概要とライフサイクル設計に多目的最適化の手法を適用する方法について述べる。

### 3.2.1 多目的最適化問題

一般に複数の目的関数を、与えられた制約条件のもとで最大または最小にする問題を多目的最適化問題という。便宜上、最小化するように目的関数を設定すると、一般的に、多目的最適化問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} &\text{find} && x_i \\ &\text{Minimize} && [F = \{f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_N(x_i)\}] \\ &\text{subject to} && g_k(x_i, p_m) \leq 0 \\ & && h_l(x_i, p_m) = 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

ここで、 $f_j$  は目的関数、 $x_i$  は設計変数、 $g_k$ 、 $h_l$  は制約関数、 $p_m$  は設計パラメータである。設計変数としては部材の寸法や形状、材質、部品の種類などがあるが、ライフサイクル設計の場合には、製品のライフサイクル特性である製品や部品の寿命、使用期間、および製品のライフサイクルオプション（部品の再使用、材料の再生、廃棄などを行うのかどうかなど）も含めることができる。制約条件は、設計変数や目的関数に関して最低限度満たさなければならない条件がある場合に設定しておく。

多目的最適化問題の解法についてはいろいろ提案されている<sup>(5)</sup>。代表的な方法としては、重み係数法（重み付け法）、 $\varepsilon$ -制約法、重み付け Tchebycheff 法、Goal Programming 法、Min-Max 法、Normal-Boundary Intersection 法（NBI 法）、遺伝的アルゴリズム（GA）などがある。これらの手法はそれぞれ長所短所をもっており、また適用する問題に対する適性があるので、問題の複雑さや解の特性、計算時間などを考慮して最適なものを選択する必要がある。以下に、本論文で用いた重み係数法、 $\varepsilon$ -制約法、NBI 法について簡単に説明する<sup>(6)(7)</sup>。

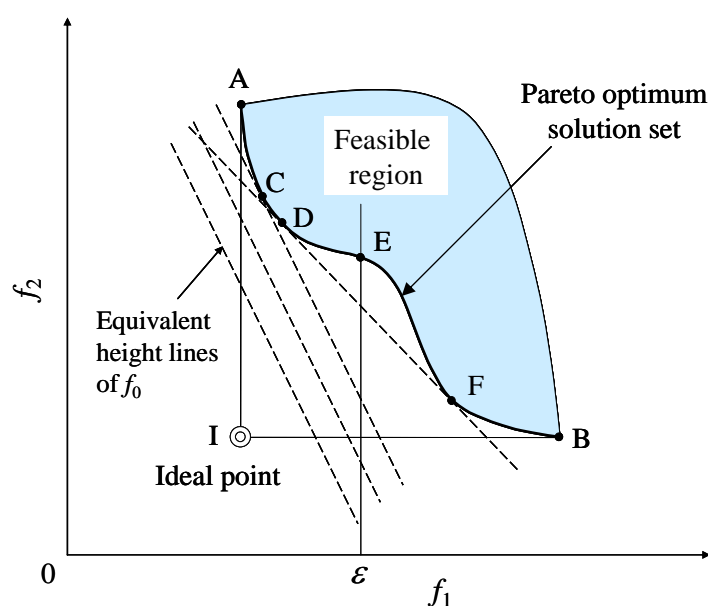
#### (1) 重み係数法（Weighting method）

今簡単のために、二つの目的関数の場合について説明する。目的関数  $f_1$  と目的関数  $f_2$  を重み係数  $\omega (0 \leq \omega \leq 1)$  を用いて足し合わせて、次の関数  $f_0$  を定義する。

$$f_0 = \omega f_1 + (1 - \omega) f_2$$

図 3-2 の目的関数空間において、 $f_0$  は  $\omega$  がある値をとる時、破線で示すような直線で表わされるので、実行可能領域内で  $f_0$  を最小にする解がパレート最適解集合の一つの点となる。 $\omega$  の値を 0 から 1 まで逐次変更して  $f_0$  を最小にする解を求めれば、図中の点 A から点 B までのパレート最適解集合の曲線を求めることができる。

この方法で注意すべきことは、一般的にはそれぞれの目的関数の単位系は重量やコストなどのように異なることである。異なる単位の量をそのまま足し合わせることは不合理なため、それぞれの目的関数を無次元量に変換する必要がある。その代表的な方法の一つとしては、目的関数の最大値と図 3-2 における理想点 I での目的関数の値との差を用いて無次元化する方法がある。また、図 3-2 に示したように、パレート最適解集合の曲線が凹形状で実行可能領域の内部方向に凹みがある場合は、重み係数の変更では対応できず、その部分のパレート最適解を求めることができない。しかしながら、実際の工学的な最適化問題ではそのような状況は多くはなく、もしある部分でパレート解がとぎれれば、その箇所だけを取り出して詳細に最適化を行えばよい。



**Fig. 3-2** Space of 2-objective functions and Pareto optimum solution set

(2)  $\varepsilon$ -制約法 ( $\varepsilon$ -constraint method) または制約変換法 (Bounded objective function method)

複数の目的関数の内の一つを除いて他を制約関数として取り扱い、それらの制約関数の上限値を  $\varepsilon$  として、その  $\varepsilon$  の大きさを逐次変更しながらそのつど最適化を行い、パレート最適解を求めていく方法である。

二目的最適化の場合に、 $f_1$  を制約条件に含めた場合には、最適化の定式化は次のように表される。

$$f_2 \rightarrow \text{最小化}, \quad f_1 \leq \varepsilon, \quad \text{他の制約条件}$$

図 3-2 において、 $f_1$  座標上にとった  $\varepsilon$  の値に対して、上記の最適化により点 E のパレート最適解が得られる。この方法では、図 3-2 に示すようにパレート最適解集合の曲線が DF 間で凹形状であっても、その間のパレート解を求めることができる。

## (2) NBI 法 (Normal-Boundary Intersection method)

本方法は、一般的な非線形が多基準最適化問題のパレート最適解をパレート面に沿って均一に求めることができる、I. Das と J.E. Dennis により開発された最適化手法であり<sup>(8)</sup>、多目的最適化問題を単一目的の制約問題に分割して探索を行う。二目的の場合は、図 3-3 に示すように目的個別の最適解 ( $f_1^*$ ,  $f_2^*$ ) を直線で結び、等間隔に基準点をとる。そして各基準点から法線を延ばし、実行可能領域境界との交点をパレート最適解とする。すなわち、図 3-3 において設計可能な範囲内で  $t$  を最大限に延ばすという方法である。

本方法の特徴は、①均一に散らばった良好なパレート最適解集合が得られる、②各基準点での解を求める際に、隣接した一つ前の重み設定における解を次の問題の初期値として利用するので、他の手法に比べて計算効率が非常に高いということである。

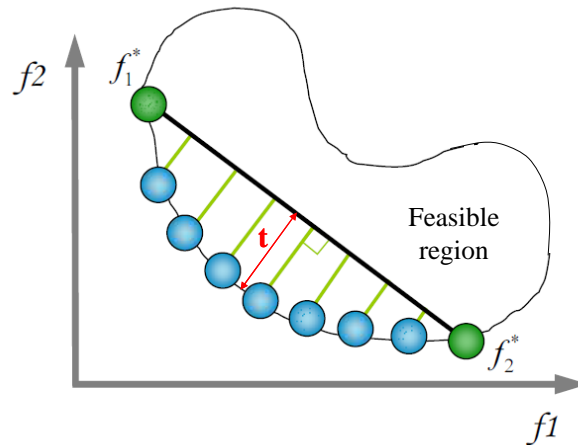


Fig. 3-3 Conceptual diagram of NBI method

### 3.2.2 ライフサイクル設計に対する多目的最適化

ライフサイクル設計においては、ライフサイクルの各段階で考慮すべき多くの評価項目があるため、それらを全て実現しようとするれば複雑な大規模問題となり取扱いが難しい。さらにそれらの評価項目をよく調べてみると、互いにトレードオフの関係になっているものがあるため、全ての項目を同時に最適にするような解は存在しない、すなわち多目的の最適化問題になる。このようにライフサイクル設計は、多くの評価項目を持つ多目的最適化問題となることが多いため、そのアプローチにおいては、対象とする評価項目をどのように整理して、どのような順序により処理をして最適な解を得るかについての方法が問題となる。

これまでのライフサイクル設計に関する研究では、第2章でも紹介したように目的関数として経済的な負荷と環境面の負荷、初期の構造コストとライフサイクルコストなどを選んで多目的最適化として取り扱ったものもある<sup>(9)(10)</sup>。ここで一つのアプローチの例として、

以前に吉村がライフサイクルを考慮した設計の最適化について示した手順<sup>(11)</sup>を紹介する。

図 3-4 は、次の 3 つの一般的なステップを含む最適な製品設計の手順を示している。

(1) 製品のライフサイクルを明らかにし、課題を確認する。

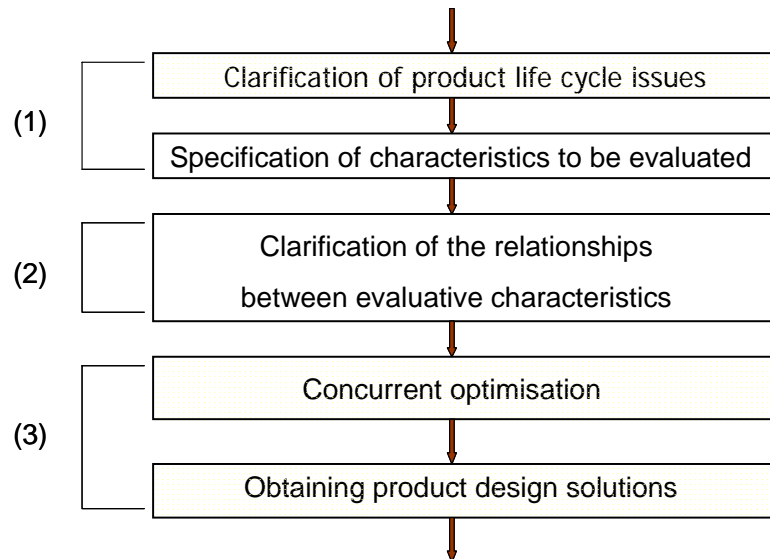
その結果に基づき、評価すべき特性を特定する。

(2) 評価すべき特性間の関係を明確にする。

(3) 意思決定問題を定式化した後、コンカレントに最適化を行い、最適解を得る。

というものである。

通常の製品設計および製品最適化においては、ステップ(3)、すなわち最適化問題の定式化と問題を解くことに最大の関心が払われているが、ステップ(1)と(2)はライフサイクル設計に対する最も満足のいく設計解を得るためには必須の事項であると主張している。



**Fig. 3-4** Flowchart of optimum design for product life cycle issues

さらに吉村らは、多くの設計変数が存在する複雑な問題の最適化に当たっては、まずその問題を単純化して段階的に取り扱うという多層最適設計手法の有効性を提唱している<sup>(12)</sup>。以下にその概要を説明する。

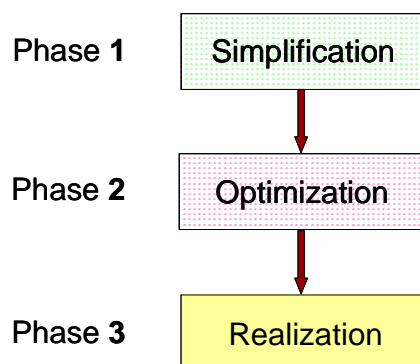
図 3-5 にこの手法のフローを示すが、この手法は、(1)単純化、(2)最適化、(3)具体化の 3 つの層で構成されている。

まず、第 1 層の単純化において、対象とする機械構造物は、実際の構造物よりも少ない数の設計変数をもつ数学モデルやシミュレーションモデルに単純化される。但し、このモデルは、実際の構造と等価な構造特性値を有するものとする。

次に、第 2 層の最適化において、その単純化されたモデルに対して数理計画法を用いて

最適化を実施する。このモデルでは、設計変数の数が大幅に減少しているので、既存の最適化手法の適用が容易となり、かつ解が局所的な最適値に収束する可能性も小さくなる。

最後に、第3層の具体化において、最適化層で決定された全ての要求事項が満足されるように、実際の機械構造の具体的な形状と寸法を決定する。尚この時、最適化の段階では考慮されていなかった付加的な設計上や機能上の要求を加味する。



**Fig. 3-5** The flow of the design optimization method based on multiphase procedure

この多層最適設計法は、特にボルト結合部や案内面のような結合部を含む機械構造に適用することができるとしている<sup>(13)</sup>。

この考え方は、複雑な機械構造システムの設計最適化において、システムの本質から理解して大域的な最適解を求めようとするアプローチであり、最適化のベースになる有効な考え方である。特に“単純化”のフェーズは重要であり、単純化には、対象問題をより小さな単純な問題に“分解”することや、より単純な特性に“置き換える”などの操作が含まれる。従って、次章以降で述べるライフサイクル設計の最適化においても、このアプローチを参考にした。

## 参考文献

- (1) 吉村允孝, モノづくりにおけるシステム設計最適化, (2007), p.33, 養賢堂.
- (2) Kuo,T.C., Huang,S.H. and Zhang,H.C., Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41(2001), pp.241-260.
- (3) Yoshimura,M. and Takeuchi,A., Concurrent Optimization of Product Design and Manufacturing Based on Information of Users' Needs, *International Journal of Concurrent Engineering : Research and Applications*, 2, 2(1994), pp.33-44.
- (4) 山川 宏編, 最適設計ハンドブック, (2003), p.91, 朝倉書店.
- (5) Cohon,J.L., *Multiobjective Programming and Planning*, (1978), pp.98-127, Academic Press, New York.
- (6) 吉村允孝, モノづくりにおけるシステム設計最適化, (2007), p.105, 養賢堂.
- (7) サイバネットシステム株式会社編, 「多目的最適化」に関する説明資料
- (8) Das,I. and Dennis,J.E., Normal Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems, *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, Vol.8, No.3(1998), pp.631-657.
- (9) Erol,P., Thoming,J., ECO-design of reuse and recycling networks by multi-objective optimization, *J. of Cleaner Production*, 13, (2005), pp.1492-1503.
- (10) Fragiadakis, M., Lagaros, N.D. and Papadrakakis, M., Performance-based multiobjective optimum design of steel structures considering life-cycle cost, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.32, No.1(2006), pp.1-11.
- (11) Yoshimura,M., Design Optimisation for Product Life Cycle, *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives* (Edited by G.Q.Huang), (1996), pp.424-427, Chapman & Hall.
- (12) Yoshimura,M., Hamada,T., Yura,K. and Hitomi,K., Design Optimization of Machine-Tool Structures with respect to Dynamic Characteristics, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol.105, March(1983), pp.88-96.
- (13) 吉村允孝, 濱田年男, 由良憲二, 野池清文, 人見勝人, 機械構造システムの多層最適設計 (単純化構造を媒体とした振動特性に関する最適化と具体設計の探索), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.50, No.452 (1984), pp.724-732.

## 第 4 章 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコストの最適化手法

### 4.1 緒言

地球温暖化に対する温室効果ガスの影響や、化石燃料や希少金属の資源枯渇が世界の喫緊の課題になっている現在社会においては、地球環境保護に配慮した経済社会の持続的な発展が強く求められている。持続的な発展を実現するためには、循環型の社会に移行していく必要がある。すなわち、大量生産・大量消費で生産物を廃棄し続けるのではなく、資源の消費と製造や使用のためのエネルギーをできるだけ少なくするとともに、使用済みの製品はできるだけ再使用やリサイクルを行うというやり方に変えることが必要である。このような問題を扱う技術体系は、ライフサイクルエンジニアリング (Life Cycle Engineering : LCE) と呼ばれている。これは製品のライフサイクルを俯瞰的に捉え、設計、製造、輸送、使用、回収、廃棄、再生などの段階を全て考慮して、資源消費を抑え環境負荷を少なく、かつ製品の価値を高めるためにはいかにすればよいかを研究する学問分野である<sup>(1)(2)</sup>。また製品の回収から再生への操作は逆生産 (Inverse Manufacturing) と呼ばれており、循環型の生産を安定して実行していくためには、逆生産が技術的かつ採算的にも実現可能になるようにしなければならない<sup>(3)</sup>。

循環型社会においては、従来のような製品の機能や製造コストのみに着目した設計ではなく、その製品のライフサイクルを考慮した製品設計であるライフサイクルデザイン (Life Cycle Design : LCD) が必要である。これは製品の企画から始まり、設計、製造、輸送、使用、メンテナンス、廃棄、再生という製品のライフサイクルに亘って、各ステージでの製品の要求事項やその取り扱いについて設計の時点で検討しておくものである<sup>(4)(5)</sup>。資源の有効利用や環境負荷の低減を目指した環境調和型設計や環境適合設計、エコデザインなども LCD に含まれる<sup>(6-8)</sup>。また従来から組立のための設計や製造のための設計が行われ、製造コストの低減や品質の改善、製品開発期間の短縮などに大きな効果を発揮してきたが、近年は環境面の重視から、分解、リサイクル、メンテナンスなどの問題を設計段階で考慮する取り組みが増えている。これらの研究は Design for X (DFX) と呼ばれている<sup>(9)</sup>。一方、LCE や LCD に関する研究もこれまでに多数行われてきており、LCP (Life Cycle Planning) や環境指向型 QFD (Quality Function Deployment) のような LCD を支援する手法や考え方の報告<sup>(10-15)</sup>、また定量的なアプローチとしてのライフサイクルシミュレーションやライフサイクルコストのモデル化の研究などが種々実施されている<sup>(16)(17)</sup>。

ところで LCE の問題においては、環境性の向上と経営性の向上はトレードオフの関係にあることが多い。すなわち資源・エネルギーや環境負荷の低減と製品性能の向上や製造コストの低減などを同時に実現することは難しいことが多い。従って環境性と経営性のバランスをいかに取っていくかが問題であり、環境面と経営面を同時に支援する設計支援システムの構築が望まれるのである。これに関して吉村は、以前にライフサイクルを考慮した

設計の最適化についてその手順を示している<sup>(18)</sup>。すなわち、まず製品のライフサイクル段階およびそこで評価すべき特性を明確にし、次にそれぞれの評価特性間の関係を明らかにする。そして問題を定式化した後、これらをコンカレントに最適化することにより設計解を得るというものである。しかしながらこれまでの研究に関しては、ライフサイクルに関わる評価特性の最適化という観点から定量的な解析を行ったものはあまり多くない。

以上のような背景を踏まえて、本章ではライフサイクル設計の最適化に関して概念設計の段階を取り上げ、モデルの構築や解析を行うことにした。一般的に環境負荷の少ない製品の使い方としては、使用エネルギーを抑えかつ故障を少なくして長期間使用（長寿命化）し、製品の廃棄量をできるだけ少なくすることである。このためにメーカーではこれまで、製品の省エネルギー化やメンテナンスフリー化、また高価格製品については耐久性の向上による長寿命化やメンテナンスの容易化に努めてきている。これらはライフサイクル設計において重要な戦略である。ところが、省エネルギー化や製品の長寿命化を進めようとすると通常は製造コストの上昇を伴うことになるため、メーカーは顧客ニーズや需要動向に配慮しながら製品の販売戦略を決め、製品の価格すなわち製造コストを設定しなければならない。従って、結局このような意思決定問題を支援するためには、製品のライフサイクルに関わるコストを適切に評価することができる定量的な解析方法が必要となる。そこで本章では、消費エネルギーが可変な製品を対象として、ライフサイクル段階としては製造、使用、メンテナンスを考慮した場合について研究した。すなわち、研究の目的としては、これらの3つの段階でのコストに関して数理モデルを構築することにより、製品のライフサイクルにおけるトータルコストを低減するための定量的な意思決定を支援できるような最適化手法を提案することとした。

## 4.2 提案する手法の概要

本節では、今回提案する手法の設計プロセスにおける位置づけとその考え方について概要を説明する。

製品設計は、一般的に図 4-1 に示すようなプロセスで行われる。すなわち、設計対象となる製品の要求事項（ニーズなど）に基づいて、概念設計、基本設計、詳細設計とステップが進められる。ライフサイクル設計においては、概念設計などの設計プロセスの上流段階で、対象とする製品のライフサイクル特性に最適なライフサイクル戦略を決定することが重要であるとされている。本章では、この概念設計の段階において製品のライフサイクル段階を考慮した設計の最適化を図ることを目的とする。そのために製品の数値モデルを設定し、そこにおける主要な設計変数について製品の性能やコストに関する目的関数を最適化するような設計値を探索するプロセスを構想設計の範疇と考える。



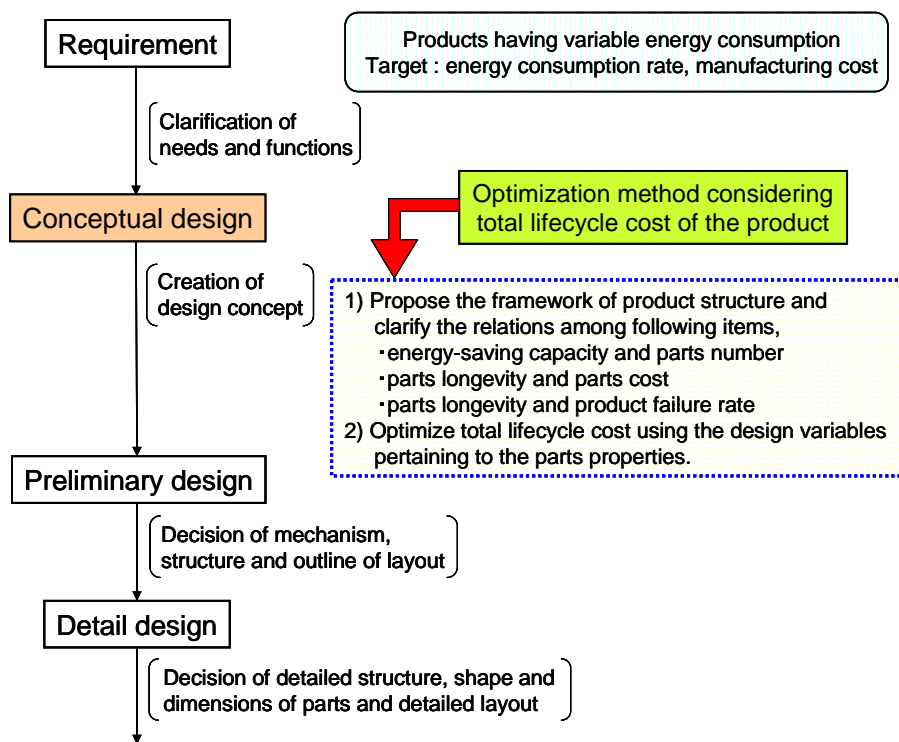


Fig. 4-1 Location of proposed method in designing process

図 4-1 に本章で取り扱う最適化手法の位置づけを示したが、本章で対象とするのは消費エネルギーが可変な製品であり、設計目標としては製品の消費エネルギー（消費電力）や製造コストが対象となる。従って、製品のモデル化においては、これらの特性を適切に表すことができるモデルを設定し、それを適当な設計変数によって表現する必要がある。今回製品のモデル化において取り上げた設計項目は、製品の構成、部品の数、部品のコスト（単価）、部品の耐用寿命、エネルギー消費率であり、エネルギー消費率を低く（すなわち、省エネルギー指向に）するためには、制御の複雑化が必要になるため、部品数が増加するという考え方を採用した。このモデルを用いて、製品のライフサイクルにおけるコストを算定し、トータルのライフサイクルコストの最適化を図る。モデル化の内容については、以下の節で説明する。

### 4.3 消費エネルギー可変型製品のモデル化

#### 4.3.1 モデルの設定

先ず消費エネルギー可変型という言葉について説明すると、「使用期間における平均値としての製品の消費エネルギーが可変」ということを意味している。言い換えれば、省エネが可能な製品である。製品の製造、使用およびメンテナンスにおけるコストを評価するために、組立て型の製品（例えば、冷蔵庫やエアコンのような家電製品）を対象とする。

そしてモデルを数理的に取り扱うために、製品の構成や特性について以下のような仮定をおく。

(1) 製品は、エネルギー消費に直接的に関係しない部分と関係する部分に分けられるとし、これらをそれぞれ基本性能部および省エネ機能部と称する。さらに基本性能部は、故障をしない部分と故障をする部分に分けられるとして、これらをそれぞれ、故障をしない部分 **P1**、故障をする部分 **P2** と称する。省エネ機能部は **P3** と称し故障をする部分であるとする。これらの部分の部品点数をそれぞれ  $n_1, n_2, n_3$  とすると、この製品の全部品点数  $N$  は、 $N = n_1 + n_2 + n_3$  と表すことができる。

(2) 部品の価格について、**P1, P2, P3** 各部の部品の平均価格をそれぞれ  $p_1, p_2, p_3$  [円/個] とする。一般的に部品の価格は、その寿命が大きいほど高くなると考えられるので、部品価格はその平均寿命 (MTTF に相当するもので、以下耐用寿命と称し  $l$  で表す) に比例して変化すると考える。今耐用寿命の基準値を  $l_0$  として、**P2, P3** 部の耐用寿命をそれぞれ  $l_2, l_3$  で表すと、それらの部品の平均価格は  $l_2, l_3$  を用いて次のように表すことができる。

$$p_2 = \{ 1 + k(l_2 - l_0)/l_0 \} \times p_{20} \quad (4.1)$$

$$p_3 = \{ 1 + k(l_3 - l_0)/l_0 \} \times p_{30} \quad (4.2)$$

ここでは、簡単のために **P2** と **P3** 部の耐用寿命の基準値は同じ  $l_0$  とした。上式で  $k$  は比例定数、また  $p_{20}, p_{30}$  は  $l_2, l_3$  が基準値  $l_0$  となる時の平均価格である。

(3) 製品は部品の組立てで成り立っており、製品の組立作業費は組立作業単価に部品点数を掛けたものとする。組立作業単価を全ての部品に対して一定の  $a$  [円/個] とすると、製品の組立作業費は、 $a \times N$  となる。

(4) 製品の使用エネルギーの算出については、単位時間当たりの使用エネルギー (エネルギー消費率と称する) を  $e$  (単位はワット:W) とする。ここで製品の省エネルギーについて次のように考える。消費エネルギーの少ない、いわゆる省エネ度の高い (省エネがよく行われている) 製品を作るためには、省エネ制御に係わる部品がより多く必要であると仮定する。一般的に複雑な制御を行わせるためには部品点数が増加する傾向があり、この仮定は合理的なものと言える。省エネ度はエネルギー消費率  $e$  の大きさによって表すことができ、 $e$  の値が小さいほど省エネ度が高いと考える。このような考え方にに基づき、エネルギー消費率  $e$  は、省エネ機能部の部品点数  $n_3$  と関係づけて、次のように表されると仮定する。

$$e = e_0 \times \{ 1 - n_3 / (n_1 + n_2) \} \quad (4.3)$$

ここで  $e_0$  は、ベースとなる定数である。

(5) この製品の故障形態が“指数分布”に従うと仮定すると、故障率は時間に無関係に一定となり、平均寿命は故障率の逆数となることから、**P2** および **P3** 部の故障率をそれぞれ  $\lambda_2, \lambda_3$  とすると、これらは耐用寿命  $l_2, l_3$  を用いて次式のように表すことができる。

$$\lambda_2 = 1/l_2 \quad (4.4)$$

$$\lambda_3 = 1/l_3 \times n_3 / 50 \quad (4.5)$$

式(4.5)の表現については、 $n_3$ が50以上の値をとるとして、故障率 $\lambda_3$ は部品点数 $n_3$ に比例して増加すると考えたことによる。製品の故障率 $\lambda$ は、P2およびP3の部分が直列に配置されている場合には、 $\lambda = \lambda_2 + \lambda_3$ となるため、製品のMTTFとしての耐用寿命 $L$ は、 $L = 1/\lambda$ と表される<sup>(19)(20)</sup>。

(6) メンテナンス費の算出については、P2およびP3部の故障発生時の修理作業単価は、簡単のために、その内容によらず一定 $r$  [円/回]と仮定する。

### 4.3.2 ライフサイクルコストの定式化

4.3.1節の前提に基づき、以下に製品のライフサイクルにおける各コストの算式を誘導する。

#### (1) 製造コスト

製品製造コスト $C_p$ は、部品費用と組立費の和であるとする。従って、

$$C_p = p_1 n_1 + p_2 n_2 + p_3 n_3 + aN$$

ここに式(4.1), (4.2)の $p_2, p_3$ を代入し、さらに式(4.3)を用いて $n_3$ を $e$ で表して上式に代入すると、製造コストは次式のように表される。

$$C_p = kp_{20}n_2/l_0 \times l_2 + kp_{30}(n_1 + n_2)(1 - e/e_0)/l_0 \times l_3 - \{(1 - k)p_{30} + a\}(n_1 + n_2)/e_0 \times e + \{p_1 + (1 - k)p_{30} + 2a\} \times n_1 + \{(1 - k)(p_{20} + p_{30}) + 2a\} \times n_2 \quad (4.6)$$

#### (2) 使用エネルギーコスト

製品の使用エネルギーコスト $C_u$ は、エネルギー単価を $\alpha$  [円/kWh]、使用期間を $T$  [年]とすると、時間 $T$ に比例した次式で表される。

$$C_u = \alpha T \times e \quad (4.7)$$

#### (3) メンテナンスコスト

部品が故障することにより製品故障が起こると考える。故障発生時の修理費用は仮定したように一定値 $r$ であり、故障回数は $T/L$ で求められることから、使用期間 $T$ におけるメンテナンスコスト $C_m$ は、式(4.3), (4.4), (4.5)を用いて次式のように表される。

$$\begin{aligned} C_m &= T/L \times r = Tr \times \lambda \\ &= Tr \{1/l_2 + 1/l_3 \times n_3 / 50\} \\ &= Tr \{1/l_2 + (n_1 + n_2)(1 - e/e_0) / 50 \times 1/l_3\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

これらの各コストの式からも推察されるように、設計変数として各部の耐用寿命 $l_2, l_3$ とエネルギー消費率 $e$ を考えた場合、製造コスト $C_p$ とメンテナンスコスト $C_m$ および製造コスト $C_p$ と使用エネルギーコスト $C_u$ はトレードオフの関係にある。それらの様子を纏めて表4-1に示す。この表より判るように、 $e$ に関しては、使用エネルギーコスト $C_u$ は、製造コスト $C_p$ と同様にメンテナンスコスト $C_m$ ともトレードオフの関係になっている。これは

式(4.3)で示したように、このモデルが省エネ度を高める（ $e$ の値が減少する）ためには部品点数  $n_3$ を増加することにしており、そのために省エネ度が高まると使用エネルギーコスト  $C_u$ は減少するが、式(4.5)において  $n_3$ の増加により省エネ機能部の故障率が大きくなり、その結果メンテナンスコストが増加することによるものである。

**Table 4-1** Relation between objective costs and design variables

Design Variables	$C_p$	$C_u$	$C_m$
$l_2$ increase	increase	—	decrease
$l_3$ increase	increase	—	decrease
$e$ decrease	increase	decrease	increase

## 4.4 最適化解析

### 4.4.1 解析の手法

前節の考察より、本製品のライフサイクルにおけるトータルコストを低減するための最適解を得るには、多目的の最適化問題として取り扱うのが妥当である。そこで目的関数としてはまず問題とすべき製造コストを選び、次にこれと主たるトレードオフ関係にある使用コストとメンテナンスコストを対象にし、問題を簡単にするため重みを等価にした使用コストとメンテナンスコストの和を二つ目の目的関数として、以下のように二目的の最適化問題として定式化する。

目的関数：

$$\phi = [f_1, f_2] \rightarrow \text{最小化} \quad (4.9)$$

$$f_1 = C_p \quad (4.10)$$

$$f_2 = C_u + C_m \quad (4.11)$$

制約条件：

$$g_1 = l_0 - l_2 \leq 0 \quad (4.12)$$

$$g_2 = l_2 - l_3 \leq 0 \quad (4.13)$$

$$g_3 = l_3 - T \leq 0 \quad (4.14)$$

$$g_4 = -e + 0.6e_0 \leq 0 \quad (4.15)$$

$$g_5 = e - 0.9e_0 \leq 0 \quad (4.16)$$

制約条件としては、各寿命  $l_2, l_3$  の上下限値を  $T$  と  $l_0$  とし、またエネルギー消費率  $e$  についても、基準値  $e_0$  をもとに上下限値を設けた。式(4.13)の意味は、P3 部は重要部分であり部品の価格も高いため ( $p_{30} > p_{20}$ )、P2 部よりも耐用寿命を長く設定した ( $l_2 \leq l_3$ ) ということである。

多目的最適化問題の解法としては従来いくつかの方法が提案されているが<sup>(21)</sup>、今回は重み係数法(Weighting Method)<sup>(22)</sup>を用いて解くことにする。重み係数を  $\omega$  ( $0 < \omega < 1$ ) とすると、式(4.9)～(4.11)を単一目的に変換した目的関数  $\phi$  は次式で表される。

$$\phi = \omega f_1 + (1-\omega)f_2 = \omega C_p + (1-\omega)(C_u + C_m) \quad (4.17)$$

式(4.17)の目的関数の最小化問題を、 $\omega$ の値を0から1の間で変化させて、式(4.12)～(4.16)の制約条件のもとで解くことになる。今回の目的関数は、式(4.6)と式(4.8)より非線形式で表されているため、解析的には Karush-Kuhn-Tucker の最適性の一次の必要条件（K-K-T 条件）を適用して解くことができる。以下にその手順の概要を説明する。

#### 最適性の一次の必要条件（Karush-Kuhn-Tucker Conditions）

式(4.17)の目的関数と式(4.12)～(4.16)の制約条件について、Lagrange 乗数  $\mu_i (i=1,...,5)$  を導入して、Lagrangian を  $\Phi = \phi + \mu_1 g_1 + \mu_2 g_2 + \mu_3 g_3 + \mu_4 g_4 + \mu_5 g_5$  とおくと、K-K-T 条件は、

$$\frac{\partial \Phi}{\partial l_2} = \frac{\partial \phi}{\partial l_2} + \mu_1 \frac{\partial g_1}{\partial l_2} + \mu_2 \frac{\partial g_2}{\partial l_2} = \frac{\partial \phi}{\partial l_2} - \mu_1 + \mu_2 = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial l_3} = \frac{\partial \phi}{\partial l_3} + \mu_2 \frac{\partial g_2}{\partial l_3} + \mu_3 \frac{\partial g_3}{\partial l_3} = \frac{\partial \phi}{\partial l_3} - \mu_2 + \mu_3 = 0 \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial e} = \frac{\partial \phi}{\partial e} + \mu_4 \frac{\partial g_4}{\partial e} + \mu_5 \frac{\partial g_5}{\partial e} = \frac{\partial \phi}{\partial e} - \mu_4 + \mu_5 = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu_i} = g_i \leq 0 \quad (i=1,...,5) \quad (\text{式(4.12)～式(4.16)と同じ})$$

$$\mu_1 g_1 = \mu_1 (l_0 - l_2) = 0 \quad (4.21)$$

$$\mu_2 g_2 = \mu_2 (l_2 - l_3) = 0 \quad (4.22)$$

$$\mu_3 g_3 = \mu_3 (l_3 - T) = 0 \quad (4.23)$$

$$\mu_4 g_4 = \mu_4 (-e + 0.6e_0) = 0 \quad (4.24)$$

$$\mu_5 g_5 = \mu_5 (e - 0.9e_0) = 0 \quad (4.25)$$

および、 $\mu_1 \geq 0, \mu_2 \geq 0, \mu_3 \geq 0, \mu_4 \geq 0, \mu_5 \geq 0$  となる。

式(4.18)～(4.20)を式(4.6)～(4.8)および式(4.17)を用いて書き直すと、以下の条件式が得られる。式(4.18)より

$$\omega \frac{\partial C_p}{\partial l_2} + (1-\omega) \frac{\partial C_m}{\partial l_2} - \mu_1 + \mu_2 = 0$$

よって

$$\omega k p_{20} n_2 / l_0 - (1-\omega) Tr / l_2^2 - \mu_1 + \mu_2 = 0 \quad (4.26)$$

式(4.19)より

$$\omega \frac{\partial C_p}{\partial l_3} + (1-\omega) \frac{\partial C_m}{\partial l_3} - \mu_2 + \mu_3 = 0$$

よって

$$\omega k p_{30} (n_1 + n_2) (1 - e / e_0) / l_0 - (1-\omega) Tr (n_1 + n_2) (1 - e / e_0) / 50 l_3^2 - \mu_2 + \mu_3 = 0 \quad (4.27)$$

式(4.20)より

$$\omega \frac{\partial C_p}{\partial e} + (1-\omega) \left( \frac{\partial C_u}{\partial e} + \frac{\partial C_m}{\partial e} \right) - \mu_4 + \mu_5 = 0$$

よって

$$-\omega (n_1 + n_2) / e_0 \{ k p_{30} l_3 / l_0 + (1-k) p_{30} + a \} + (1-\omega) \{ \alpha T - Tr (n_1 + n_2) / 50 e_0 l_3 \} - \mu_4 + \mu_5 = 0 \quad (4.28)$$

以上より， $\mu_i (i=1, \dots, 5)$  が正または 0 の全ての場合について，上記の式を満足する設計変数  $l_2, l_3, e$  を求めることになる．

$\mu_i$  の場合分けとしては，32 (2<sup>5</sup>) 通りが考えられるが， $\mu_1 > 0, \mu_2 > 0$  かつ  $\mu_3 > 0$  のケースなどあり得ないケースを除くと結局 11 通りがなくなり，残り 21 通りの場合を調べればよいことになる．この内で， $\mu_i$  が全て 0 の場合について調べてみると，式(4.26)より，

$$l_2 = \sqrt{\frac{Trl_0(1-\omega)}{kp_{20}n_2\omega}} \quad (4.29)$$

同様に，式(4.27)より  $e$  の値に関係なく，

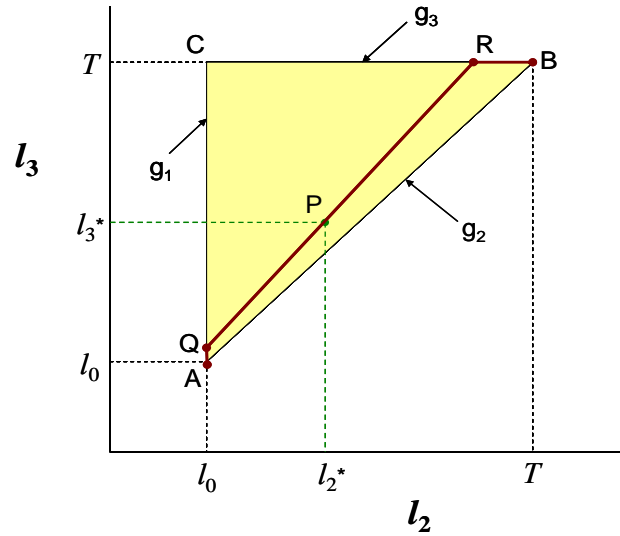
$$l_3 = \sqrt{\frac{Trl_0(1-\omega)}{50kp_{30}\omega}} \quad (4.30)$$

が得られる．式(4.30)を式(4.28)に代入することにより， $0 < \omega < 1$  の範囲で  $\omega$  の値 ( $\omega^*$ ) が 1 つ求まり，これを用いて式(4.29)と(4.30)より  $l_2$  と  $l_3$  の値  $l_2^*, l_3^*$  が求められる．すなわち， $\omega$  が値  $\omega^*$  をとり， $l_2, l_3$  がこれより求められた値  $l_2^*, l_3^*$  をとる場合には， $e$  の値がいかなる値でも上式が成り立つ．つまり  $e$  の値が決まらないということである．また式(4.29)と(4.30)が成り立つ場合， $l_2$  と  $l_3$  の比をとると，

$$l_3/l_2 = \sqrt{\frac{n_2p_{20}}{50p_{30}}} \quad (4.31)$$

となり，この比は  $k$  や  $\omega$  の値に関係なく一定となる．

その他の 20 通りの場合については，後の数値計算例に示すような具体的な数値を代入した算式に対して，解の存在の有無を調べた．以上の検討結果を全てまとめて示すと，表 4-2 の通りとなり，解の存在しない場合は×で表している．またこの表において解の存在する場合は，設計変数  $l_2, l_3$  の空間で表すと図 4-2 のようになる．図中に表示した各点 A, B, C, ..., R は，表 4-2 の備考に記載した各点に対応している．



**Fig. 4-2** Distribution of Optimum Solution in Design Variables Space ( $l_2-l_3$ )

**Table 4-2** Cases with optimum solutions

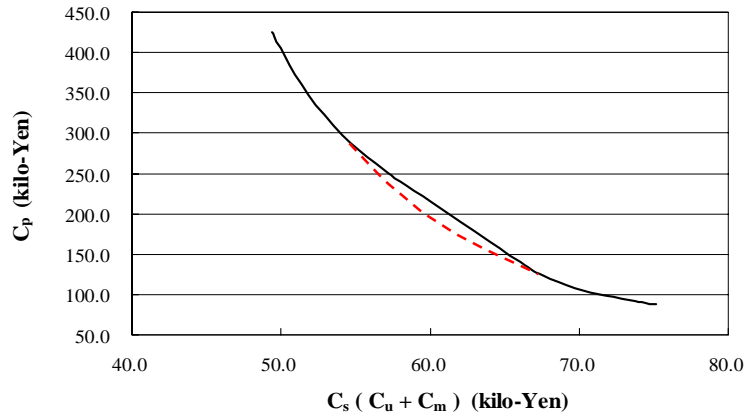
Case No.	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	Solution	Remarks
1	0	0	0	0	0	○	$l_2 = l_2^*, l_3 = l_3^*$ , point P
2	0	0	+	0	0	×	
3	0	+	0	0	0	×	
4	+	0	0	0	0	×	
5	0	+	+	0	0	×	
6	+	0	+	0	0	×	$l_2 = l_0, l_3 = T$ , point C
7	+	+	0	0	0	×	
8	+	+	+	0	0	×	impossible case
9	0	0	0	+	0	○	$l_2 > l_2^*, l_3 > l_3^*$ , line PR
10	0	0	+	+	0	○	$l_2 \neq l_3, l_3 = T$ , line RB
11	0	+	0	+	0	×	
12	+	0	0	+	0	×	
13	0	+	+	+	0	○	$l_2 = l_3 = T$ , point B
14	+	0	+	+	0	×	$l_2 = l_0, l_3 = T$ , point C
15	+	+	0	+	0	×	
16	+	+	+	+	0	×	impossible case
17	0	0	0	0	+	○	$l_2 < l_2^*, l_3 < l_3^*$ , line QP
18	0	0	+	0	+	×	
19	0	+	0	0	+	×	
20	+	0	0	0	+	○	$l_2 = l_0, l_2 \neq l_3$ , line AQ
21	0	+	+	0	+	×	
22	+	0	+	0	+	×	$l_2 = l_0, l_3 = T$ , point C
23	+	+	0	0	+	○	$l_2 = l_3 = l_0$ , point A
24	+	+	+	0	+	×	impossible case
25~32	0 or +	0 or +	0 or +	+	+	×	impossible cases

#### 4.4.2 パレート最適解の導出

前節の手法において、式(4.17)に対して  $\omega$  の値を 0 から 1 の間で適当に変化させて最適解を求め、 $\omega$  がそれぞれの値をとる場合の、 $f_1$  と  $f_2$  の値を 2 次元のグラフにプロットすれば、パレート最適解集合を得ることができる。次節で述べるケーススタディにおいては、計算機により  $f_1$  と  $f_2$  の最適解を計算した。但し  $l_2$  と  $l_3$  が、式(4.29)と(4.30)で表される場合の、 $\omega$  が値  $\omega^*$  をとる時は、図 4-3 に模式的に示すように、パレート最適解の実行可能領域が僅かに凹になるため、前節で示した重み係数法では解が得られない<sup>(23)</sup>。そして本モデルの場合は、 $e$  の値も定まらない状態になる。そのために  $e$  の値が上下限の中間値をとる場合のパレ

ート最適解は、 $\varepsilon$ -制約法 ( $\varepsilon$ -Constraint Method) <sup>(21)</sup>を用いて求めた。

本モデルのパレート最適解としては、横軸に  $f_2$  すなわち使用コストとメンテナンスコストの和  $C_s$  を、縦軸に  $f_1$  すなわち製造コスト  $C_p$  をおいた。このパレート最適解を用いることにより、 $C_s$  を下げるためには  $C_p$  の値はどの位まで許容されるか、また設計パラメータである部品価格に関する係数や修理作業単価をどのように選べば、満足する  $C_s$  や  $C_p$  が得られるかを判断することができる。



**Fig. 4-3** Concave shape of Pareto optimum solution set

## 4.5 数値計算例

### 4.5.1 計算結果

定量的な検討を行うために、ケーススタディとして製品の特性値としての部品点数や部品価格に具体的な数値を与えて解析を行った。消費電力の基準値である  $e_0 = 50 \text{ W}$  については、実際の冷蔵庫の場合の年間消費電力量を参考にして設定したが、その他の数値については簡単のために仮想的なものとした。これらの設計パラメータは以下の通りである。

$$n_1 = 400, \quad n_2 = 100, \quad p_1 = 100 \text{ 円}, \quad p_{20} = 100 \text{ 円}, \quad p_{30} = 150, \quad 200 \text{ 円}, \quad a = 50 \text{ 円}, \\ e_0 = 50 \text{ W}, \quad \alpha = 0.1314 \text{ 千円/W} \cdot \text{年}$$

これらのパラメータを用いた場合の各コストの算式は、4.3.2 節の式(4.6), (4.7), (4.8)より、以下ようになる。

$$C_p = \frac{10k}{l_0} \times l_2 + \frac{7.5k(10 - 0.2e)}{l_0} \times l_3 + 0.5(3k - 4) \times e + 5(35 - 17k)$$

ここで  $l_0 = 2.5$  年と設定すると、 $p_{30} = 150$  の場合は、

$$C_p = 4kl_2 + 3k(10 - 0.2e)l_3 + 0.5(3k - 4)e + 5(35 - 17k) \quad (4.32)$$

同様に、 $p_{30} = 200$  の場合は

$$C_p = 4kl_2 + 4k(10 - 0.2e)l_3 + 0.5(4k - 5)e + 10(20 - 11k) \quad (4.33)$$



$$C_u = 0.1314T \times e \quad (4.34)$$

$$C_m = Tr\{1/l_2 + (10 - 0.2e) \times 1/l_3\} \quad (4.35)$$

制約条件は，4.4.1 節の式(4.12)～(4.16)に  $l_0 = 2.5$ ， $e_0 = 50$  を代入して次式のようになる．

$$g_1 = 2.5 - l_2 \leq 0 \quad (4.36)$$

$$g_2 = l_2 - l_3 \leq 0 \quad (4.37)$$

$$g_3 = l_3 - T \leq 0 \quad (4.38)$$

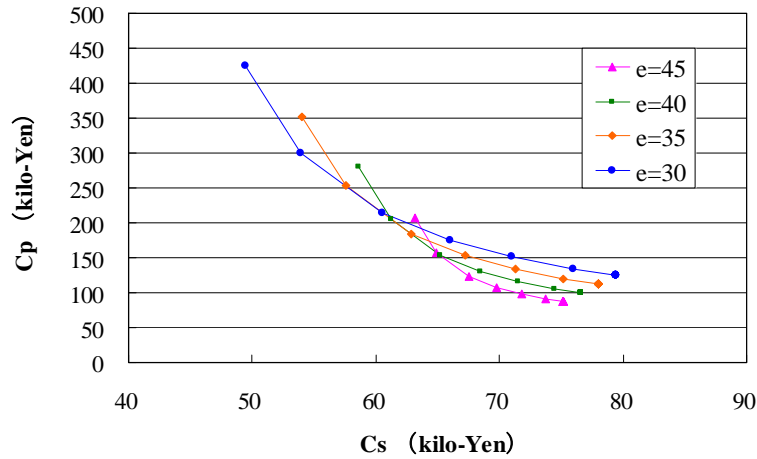
$$g_4 = -e + 30 \leq 0 \quad (4.39)$$

$$g_5 = e - 45 \leq 0 \quad (4.40)$$

これらの数式をもとにして，設計パラメータの影響の解析を行ったが，そこで用いた数値は次の通りである．すなわち， $k = 0.5, 1.0, 2.0$   $r = 1, 2, 3, 4, 5$  千円  $T = 10, 15$  年の場合である．これらのパラメータの各場合について，4.4.1 節の式(4.17)の最小化問題を計算機にて解きパレート最適解を求めた．以下にその結果を示す．

#### (1) 予備的な解析

3 変数の最適化問題を解く前に，先ず  $e$  を定数として  $l_2$  と  $l_3$  の 2 変数で解析した場合の，製造コスト  $C_p$  と使用コスト＋メンテナンスコスト  $C_s$  の関係を図 4-4 に示す．これは， $k = 2.0$ ， $r = 2$  千円の場合である．今回のモデルのパレート最適解が，設計変数  $e$  の変化につれてどのように変わっているかがよく分かる．

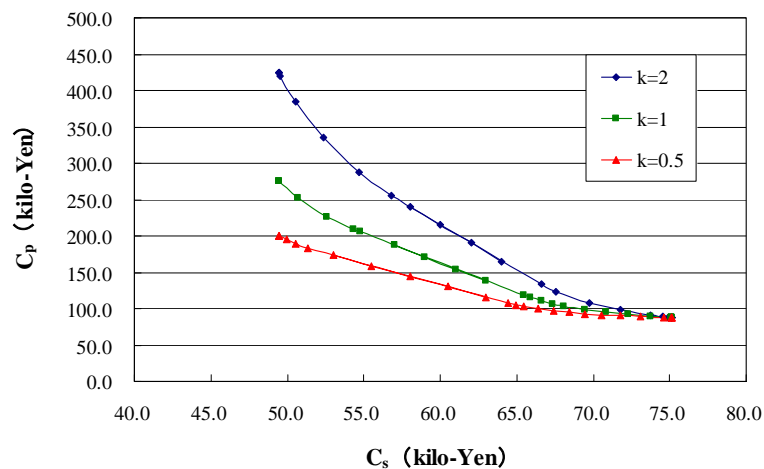


**Fig. 4-4** Pareto optimum solution for  $C_p$  and  $C_s$   
with  $e$  is held constant

#### (2) 設計変数 3 つによる解析

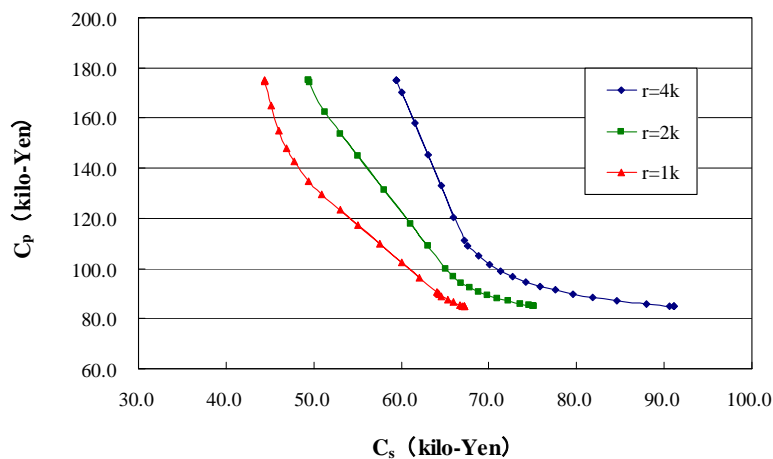
先ず設計パラメータ  $r$  を 2 千円として， $k$  を 0.5, 1.0, 2.0 と変化させた場合の  $C_p$  と  $C_s$  のパレート最適解を図 4-5 に示す．図 4-5 は  $p_{30}$  の値が 200 円の場合のもので，パラメータ  $k$

の値の変化に伴う  $C_p$  値および中央部の中凹の位置の変化がよく現れている。



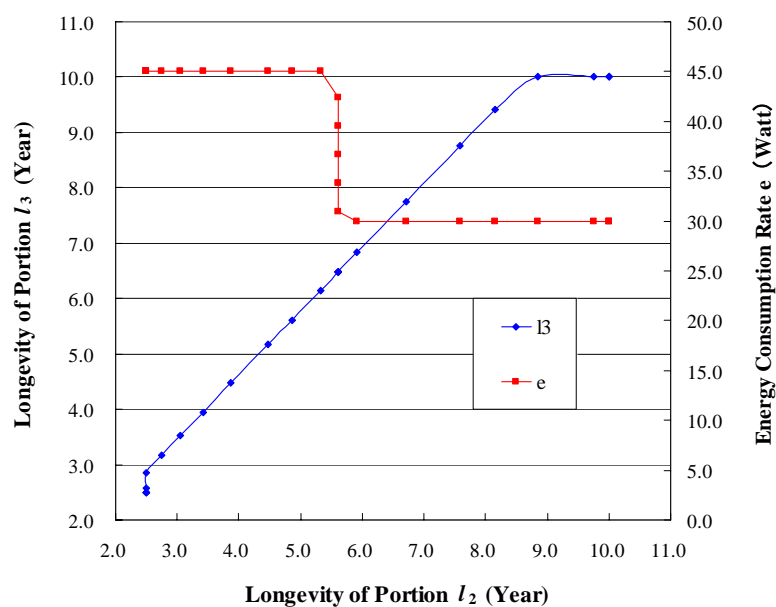
**Fig. 4-5** Pareto optimum solution for  $C_p$  and  $C_s$  with  $k$  varied

次に設計パラメータ  $k$  を 0.5 として,  $r$  を 1, 2, 4 千円と変化させた場合の  $C_p$  と  $C_s$  のパレート最適解を図 4-6 に示す. 図 4-6 以降の図については,  $p_{30}$  の値が 150 円の場合のものである.



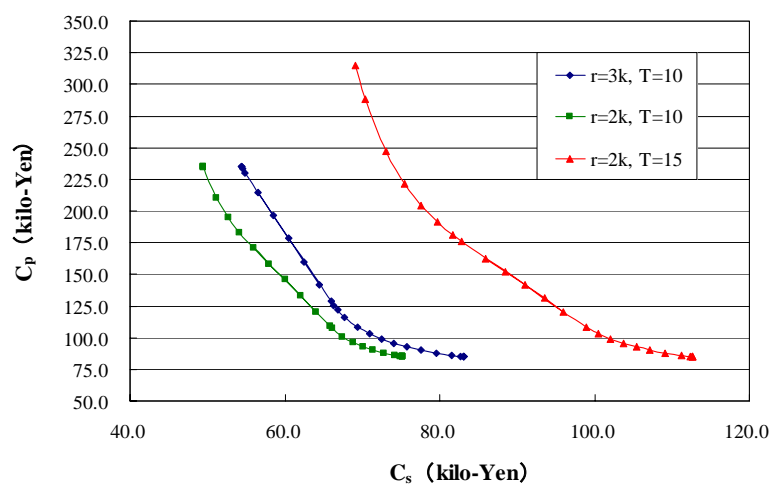
**Fig. 4-6** Pareto optimum solution for  $C_p$  and  $C_s$  with  $r$  varied

また  $k = 1.0$ ,  $r = 2$  千円の場合の  $C_p$  と  $C_s$  のパレート最適解に対する設計変数の値を図 4-7 に示す. 図 4-7 は 4.4.1 節で説明した図 4-2 と比較して, 理解しやすいように表したものである.



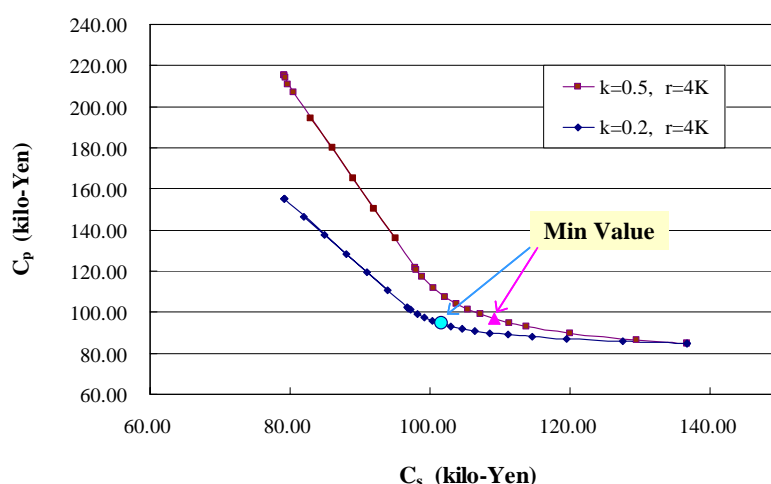
**Fig. 4-7** Optimum solution set of design variables

次に使用期間を 15 年に設定してパレート最適解を求めた結果を使用期間 10 年の場合と比較して図 4-8 に示す。



**Fig. 4-8** Pareto optimum solution for  $C_p$  and  $C_s$   
with  $T$  and  $r$  varied

さらに使用期間を 15 年とした場合について、ライフサイクルにおけるトータルコスト ( $C_p + C_s$ ) の最小値を検討したパレート最適解を図 4-9 に示す。



**Fig. 4-9** Search for minimum value of total life cycle cost  
in Pareto optimum solution for  $C_p$  and  $C_s$

#### 4.5.2 結果の考察

##### (1) 予備的な解析の結果について

今回のモデルでは、省エネ度が高い（ $e$ の値が小さい）製品ほど省エネ機能部の部品点数が多いという設定にしているため、 $e$ の値が小さい程省エネ機能部の故障率が大きくなり、その結果メンテナンスコストが高くなる傾向になる。このことが反映され、図 4-4 において  $C_p$  値の小さい領域で見られるように、 $e$ の値が小さい場合ほど使用コストが減少するにも拘わらず、使用コスト+メンテナンスコスト  $C_s$  は大きい値になっている。すなわち今回の  $k = 2.0$  および修理作業単価が  $r = 2$  千円の解析によって得られたパレート解については、 $C_p$  値の小さい領域では  $e$ の値が大きい（省エネ製品でない）方が優れているということになった。モデルの特性から見れば、 $e$ の値が小さくなり省エネ機能部の故障率が大きくなっても、それを相殺する以上に部品の耐用寿命が長くなれば  $C_s$  値は低くなる。すなわち、修理作業単価が低く、部品の耐用寿命が長い場合には  $C_s$  を低下させることができ、図 4-4 に見られるように  $C_p$  値の大きい領域ではそのような解が得られている。今回のモデルから言えることは、省エネ度が高くなり製造コストが高くなっても、部品の耐用寿命を長く、修理作業単価を低くすることにより  $C_s$  値を低下させることができ、製造コストを含めたトータルコストを最小にすることができる。

##### (2) 3 変数による解析の結果について

図 4-5 以降の図に示したように、本章のモデルを用いたシミュレーションによって、製造コスト  $C_p$  と、使用コストとメンテナンスコストの和  $C_s$  の最小化に関してパレート最適解を得ることにより定量的な検討を行うことができる。本解析の結果に関して以下に考察する。

先ず図 4-5 に示したように、本モデルのパレート最適解の特徴は、 $C_s$  が小さくなるにつれて  $C_p$  が増加するという傾向であるが、 $C_s$  の減少は主に省エネ（ $e$ の減少）と部品の耐用

寿命の増加の効果である。  $k$  値は耐用寿命に対する部品価格の増加率を表すものであるから、  $k$  値が大きくなるほど部品寿命の大きい ( $C_s$  値が小さい) ところで製造コスト  $C_p$  の値がより大きくなる。しかし  $C_s$  値が最大のところは部品寿命が最小値をとるため、  $k$  値が大きくなっても部品価格は増加せず、従って製造コストの増加は生じない。さらに図 4-3 で示したようなパレート最適解中央部の凹になった部分は、  $k$  値の増加につれて  $C_s$  値の大きい方 ( $e$  の最適解が上限値の側) へ移ることがわかる。すなわちパレート最適解において、  $e$  の値が上限値以下になる範囲が増加することを意味している。

図 4-6 は修理費単価  $r$  の値を変化させた時のパレート最適解であるが、  $r$  値が大きくなるとメンテナンスコストが増加するため、最適解は  $C_s$  値の大きい方へ移動するとともに、凹部が  $C_s$  値の小さい方へ移り、  $e$  が上限値をとる範囲が増加する。従ってこの範囲で製造コスト  $C_p$  の上昇を出来るだけ抑えて  $C_s$  を下げるためには、耐用寿命の延長が効果的であることが判る。

図 4-7 は  $k$  と  $r$  の値が 1 つのケースのパレート最適解における設計変数の値を表したものである。この図において、製造コスト  $C_p$  が最小の点は、エネルギー消費率  $e$  が最大で部品の耐用寿命が最小の場合であるが、  $C_p$  の増加を許容して  $C_s$  を下げるには、最初は  $e$  の値が上限値のままで (省エネせず) 部品の耐用寿命を増加させていくが、耐用寿命のある値 (4.4.1 節で述べた  $l_2^*, l_3^*$ ) の点で省エネを進めて  $e$  を下限値まで下げる。さらにそれ以上に  $C_s$  を下げるためには、  $e$  の値を下限値にした状態で部品の耐用寿命を増加させていく必要があることを表している。

ここで耐用寿命を一定にして  $e$  の値を変化させていく部分は、既述したようにパレート最適解が僅かに凹となる範囲である。この範囲は、上述したように設計パラメータ  $k$  および  $r$  の値によって 1 つのパレート最適解の中で移動する。すなわち図 4-5 より  $k$  の値が大きくなれば  $C_s$  の大きい側に、図 4-6 より  $r$  の値が大きくなれば、逆に  $C_s$  の小さい側に移動する傾向にある。

図 4-8 は使用期間  $T$  を 15 年と 1.5 倍にした場合のパレート最適解であり、比較のために  $T$  が 10 年の場合および  $T$  が 10 年で修理作業単価  $r$  を 3 千円と 1.5 倍にした場合のパレート最適解も合わせて示している。  $T$  が 15 年の場合にパレート最適解が  $C_s$  値の大きい方に移動しているのは、使用期間の延長により使用エネルギーが 1.5 倍になったためであり、また  $C_s$  が最小になる点の製造コスト  $C_p$  が、  $T$  が 10 年の場合に比べて高くなっているのは、使用期間が 15 年になったことにより、設計変数としての部品の耐用寿命が 15 年までの値をとることができるようになったために、部品コストが上昇したことによるものである。

最後に図 4-9 で使用期間が 15 年の場合について、  $C_s$  の値が大きい修理作業単価  $r$  が 4 千円の場合を示したが、このパレート解において  $C_p$  と  $C_s$  の和のトータルコストが最小になる点を求め図中に表した。この場合 ( $k=0.2, 0.5$ ) においても、  $e$  の値が減少すると製造コストが大きく増加するため、トータルコストが最小値となる点は、  $e$  の値が上限値、すなわち省エネがなされていない領域となっている。

以上の議論で示したように、本モデルを用いることによって、設計パラメータとしての  $k$  および  $r$  の値や部品寿命の制約条件などを問題に合わせて適当に設定すれば、ライフサ

イクルコストとしての使用コストおよびメンテナンスコストを、製造コストとのトレードオフを考慮して適切に決定することができる。

#### 4.6 結言

本章の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 消費エネルギー可変型の製品を想定して、製造コスト、使用コスト、メンテナンスコストを考慮してそのライフサイクルのトータルコスト低減を定量的に検討するための解析用モデルを提案した。
- (2) 評価すべき各コストの定式化については、設計変数として、製品の各部分の平均寿命としての耐用寿命 $l_2, l_3$ および製品のエネルギー消費率 $e$ を用いた。そして $l_2, l_3$ については上下限值および制約条件を、また $e$ については省エネの範囲として上下限值を設定した。
- (3) これらの制約条件のもとで製品の使用期間を定めて、製造コストの最小化と、使用コストとメンテナンスコストの和の最小化を目的関数とする二目的最適化問題を設定しパレート最適解集合を求めた。
- (4) 設計パラメータとしての部品の耐用寿命に対する部品価格の係数 $k$ や、修理作業単価 $r$ を変化させたシミュレーションにより、パレート最適解が変化する様子を明らかにした。これにより各コストに及ぼす設計パラメータの影響を定量的に把握することができ、妥当な結果が得られた。また使用期間を変更してパレート最適解の変化を調べるとともに、ライフサイクルにおけるトータルコストの最小値を探索する方法を示した。

本章で提案した手法を用いることにより、設計者は製品のライフサイクルにおけるトータルコスト最小化のために、使用コストとメンテナンスコストを合わせたコストを考慮した場合の製造コストの設定に関して、適切な意思決定をすることができる。

最後に、本研究における課題及び今後の方向について付言する。

- ・今回のモデルでは、メンテナンスコストの定式化において設計変数としては「部品の耐用寿命」のみを考慮し修理作業単価は一定と仮定したが、実際の問題ではメンテナンスコストは点検や修理の部位、修理方法の違い等によりその所要時間が増加するなど多くの要因に影響される。今回はこれらの要因を無視したが、これらの影響を正確に反映するためには、その定式化に関して、さらに詳細なモデルの検討が必要である。

- ・省エネ度に関するエネルギー消費率については、今回のモデルでは部品点数に関係づけて定式化したが、部品価格や組立費用に関係するとして定式化するなど別の方法も考えられる。要は、省エネ度の高い製品の方がより製造コストが高くなることをいかに表現するかである。今後は、本モデルの実際の製品への適用、検証が必要であると考えられる。

## 参考文献

- (1) 梅田 靖, ライフサイクルエンジニアリングの基本的な考え方, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.388-394.
- (2) 高田祥三, ライフサイクル・エンジニアリングが目指してきたもの, 2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会シンポジウム資料集, p.1-2.
- (3) インバース・マニュファクチャリングフォーラム監修, 木村文彦ほか編, インバース・マニュファクチャリング ハンドブック, (2004), p.35, 丸善.
- (4) Alting,L., Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises, *Concurrent Engineering*, (1993), pp.1-17, John Wiley & Sons, Inc.
- (5) 福田敏男, 新井史人, ライフサイクルデザインにおけるメンテナンスの役割, 精密工学会誌, Vol.66, No.12(2000), pp.1862-1865.
- (6) Otto,K. and Wood,K., Design for the Environment, Product Design; Techniques in Reverse Engineering and New Product Development, (2001), p.720, Prentice-Hall.
- (7) 山際康之, 環境調和型製品のモノづくり戦略と設計, (2002), pp.91-157, 日刊工業新聞社.
- (8) 市川芳明 編, 環境適合設計の実際, (2001), オーム社.
- (9) Kuo,T.C., Huang,S.H. and Zhang,H.C., Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41, (2001), pp.241-260.
- (10) 高田祥三, 梅田 靖, 加藤 悟, ライフサイクルデザインへのロードマップ, 精密工学会誌, Vol.66, No.12(2000), pp.1853-1857.
- (11) 大橋敏二郎, 松本義雄 : 「ライフサイクルデザインを具現化するシステムと技術」, 精密工学会誌, Vol.66, No.12(2000), p.1866-1870.
- (12) Ogushi,Y., Kandlikar,M. and Dowlatabadi,H., Assessing product life cycle strategies in the Japanese market, *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, (2006), pp.49-64, Springer.
- (13) 小林英樹, 企業におけるライフサイクル設計支援, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.425-428.
- (14) 増井慶次郎, Catherine M.Rose, 水原清司, 石井浩介, ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, 精密工学会誌, Vol.66, No.4(2000), pp.567-571.
- (15) 梅田 靖, 高田祥三, 近藤伸亮, 蔵川 圭, 加藤 悟, 環境調和型ビジネスの設計支援技術に向けて, 精密工学会誌, Vol.71, No.10(2005), pp.1214-1221.
- (16) 高田祥三, 製品ライフサイクルのシミュレーション, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.395-400.
- (17) Takai,S., A Lifecycle-Cost Model of Concept Testing, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99605(2006-9).
- (18) Yoshimura,M., Design Optimisation for Product Life Cycle, *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives* (Edited by G.Q.Huang), (1996), p.424, Chapman & Hall.
- (19) 室津義定, 米澤政昭, 邵 曉文, システム信頼性工学, (1996), p.25, 共立出版株式会社

社.

- (20) 高田祥三, ライフサイクル・メンテナンス, (2006), p.53, (株)JIPM ソリューション.
- (21) Cohon,J.L., *Multiobjective Programming and Planning*, (1978), pp.98-127, Academic Press, New York.
- (22) Yoshimura,M., Hamada,T., Yura,K. and Hitomi,K., Multiobjective Design Optimization of Machine-Tool Spindles, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol.106, (1984), pp.46-53.
- (23) Koski,J., Multicriterion Optimization in Structural Design, *Proceedings of International Symposium on Optimum Structural Design*, (1981-10), pp.10-29 - 10-36.



## 第 5 章 長期使用型製品のライフサイクルを考慮した最適システム 設計手法

### 5.1 緒言

循環型社会におけるモノづくりの設計においては、製品のライフサイクルの各段階における様々な評価項目を織り込んで製品設計を行うこと、すなわちライフサイクル設計 (Life Cycle Design) が求められる<sup>(1)(2)</sup>。設計時にライフサイクルを考慮するメリットが大きい製品は、製造以降の段階の影響の大きい製品である。例えば、使用期間が数十年と非常に長い製品は、一度製品を製造すると暫く作り直すことはなく、長期間使用され続けることになる。そのため設計段階においてその長いライフサイクルを考慮して設計しておくことが重要である。また、使用期間の長い機械製品は、航空機、鉄道車両、発電プラント、工作機械などインフラストラクチャーとして社会基盤を支えているものが多く、それらの製品のライフサイクルを考慮した設計を行うことは、結果的に社会にもたらす影響が大きい。

ライフサイクル設計の評価項目には競合関係になっているものがあり、主なものとしては最も重要な評価項目の一つであるコストと環境影響 (Environmental impact) の関係がある。この関係は現実問題として循環型社会への移行に向けての大きな障害となっている。すなわち、いくら環境影響が低いライフサイクル戦略であっても経営的に持続可能なビジネス戦略を伴っていないければ実現不可能なのである。このモノづくりにおける経営性と環境性の関係については様々な研究がなされている<sup>(3-5)</sup>。また、ライフサイクルにおけるコスト自体に関してはライフサイクルコストイング (Life Cycle Costing : LCC)<sup>(6-8)</sup>として、環境影響の評価に関してはライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment : LCA)<sup>(9)</sup>としてそれぞれ研究がなされている。しかしながら、ライフサイクルに関わる評価特性の多目的最適化という観点から定量的な解析を行ったものはあまり多くない。

そこで本章では、使用期間の長い機械製品を対象としたライフサイクル設計における定量的な意思決定を支援する最適設計法を提案することを目的とした。このような最適設計法を用いることにより、設計者はライフサイクルを通した様々な評価項目の面から設計案を検討しながら最適な製品を設計することができる。例えば、環境影響と製造コストを目的にとれば、製造時には使用する資源を少なくし、使用時には消費エネルギーを少なくし、廃棄時には資源を再利用できる製品 (環境適合製品) を最小のコストで製造することができる。

以下、5.2 節では本章で用いるライフサイクルを考慮した設計における最適化の方法論について述べる。5.3 節では適用例としてフライス盤を用いたモデル化について説明する。5.4 節ではそのモデルについてライフサイクルを考慮した最適設計手法を適用した場合の結果を説明するとともに、最適設計解の改良の方向性を考察する。そして、最後に 5.5 節で結言を述べる。

## 5.2 最適化の方法論

### 5.2.1 最適化の評価項目とその評価法

最適設計を行う場合の製品の評価項目としては、大別して製品機能、ライフサイクルコストと環境影響が挙げられる。

#### (1) 製品機能

製品機能は設計品質とも呼ばれ、設計の評価項目の中で最も基本的なものである。これは製品を使用する段階において、ユーザーが製品に望む価値の全般であり、例えば工作機械や作業用ロボットのような産業用機械では、精度、能率、稼動エネルギーなど、自動車の場合には、操縦性、加速性、燃費、居住性、外観などである。本章では、これらを定量的に評価し数値化したものを目的関数( $F_j$ )とする。ここで、添え字  $j$  は評価したい製品機能の項目を表す。ただし、評価項目の数が多い場合は設計案を評価する際に複雑になるので、重み係数を用いるなどして統合することにより指標を減らすことが必要になる。

#### (2) ライフサイクルコスト

ライフサイクルコストは企画、設計、製造、輸送、使用、保守、廃棄、再生という製品ライフサイクルの各段階にかかる費用のことである。これらの費用は一般的には、企画、設計、製造、輸送の段階は主にメーカーが負担し、使用、保守の段階は主にユーザーが負担し、廃棄、再生の段階は主にリサイクル業者が負担するという具合に、各段階において費用を直接負担する者が異なる。どの段階の費用の負担を減らすかという意味で、各段階の費用を個別に目標に設定することもできる。しかし、近年は家電リサイクル法の制定などにより廃棄、再生段階の費用をメーカーやユーザーが負担する動きがあり、ライフサイクル全体の費用を社会全体として負担する方向になりつつある。そのため、個々の段階の費用をいかに少なくするかではなく、各費用の合計を低減することが求められているという側面があるので、ここでは次式に示すように、全体のライフサイクルコストを目的関数( $C_{total}$ )として設定する。

$$C_{total} = C_{plan} + C_{design} + C_{manufacture} + C_{transport} + C_{use} + C_{maintenance} + C_{disposal} + C_{recycle} \quad (5.1)$$

#### (3) 環境影響

環境影響は持続可能な発展のための評価項目である。製品のライフサイクル全体の環境影響を評価する方法は、一般にライフサイクル影響評価(Life Cycle Impact Assessment: LCIA)手法と呼ばれており、LCIA 手法には環境影響の定義の仕方や評価の方法に関して種々のものがある<sup>(10)</sup>。また環境影響としての細かな評価項目は環境問題の数だけあり、全てを考慮することは非常に煩雑である。設計時に考慮する指標として環境影響を単一の評価指標で表すことができれば、他の特性との分析が容易になる。そのため、それぞれの環境問題に対する影響度から重み係数を用いて単一指標を求める方法が提案されており、それには従来からの問題比較型と近年主流となっている被害算定型がある。被害算定型の環

環境影響評価手法は歴史が浅く、網羅性や信頼性などにおいて解決すべき課題が多く残されているが、問題比較型に比べ社会的合意性の高い統合化手法として注目を浴びている。

被害算定型の環境影響評価手法には EPS<sup>(11)</sup>、Eco-indicator 99<sup>(12)</sup>、LIME<sup>(13)</sup> などがある。これらの手法の手順は、①特性化、②被害評価、③統合化で構成される。①特性化は、影響領域毎に設定された特性化係数を用いて潜在的な環境影響の評価を行う。②被害評価は、環境の変化を通じて人間の健康、資源、生態系がそれぞれ受ける被害量を評価する。③統合化は、影響領域間の重み付けを行って単一指標化を行う。我が国が開発した代表的な手法である LIME(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)の概念図を図 5-1<sup>(13)</sup> に示す。



Fig. 5-1 Illustration of concept and applicable scope of LIME

本章では、LCIA 手法を用いてライフサイクルの各段階において生じる環境影響を単一指標で表し、その和を目的関数( $EI_{total}$ )として設定する。なお環境影響の単位は、さまざまな影響を換算し統合しているため無次元となっているものが多く、ここでは[point]を単位とする。

$$EI_{total} = EI_{plan} + EI_{design} + EI_{manufacture} + EI_{transport} + EI_{use} + EI_{maintenance} + EI_{disposal} + EI_{recycle} \quad (5.2)$$

### 5.2.2 多目的最適化問題の設定とトレードオフ分析

前節で定義した3種類の目的関数を用いて下式に示すような多目的最適化問題を設定する。

$$\begin{array}{ll} \text{find} & x_i \\ \text{minimize} & [F_j(x_i), C_{total}(x_i), EI_{total}(x_i)] \\ \text{subject to} & g_k(x_i, p_l) \leq 0 \end{array} \quad (5.3)$$

ここで、 $x_i$  は設計変数、 $g_k$  は制約関数、 $p_l$  は設計パラメータである。設計変数は部材の寸法や形状、材質、部品の種類などに加えて、製品のライフサイクルオプションも含まれる。制約条件は、設計変数の制約や目的関数の数値目標など最低限度満たさなければならない条件がある場合に設定しておく。また、この多目的最適化問題を解くにあたって用いる手法は種々提案されているが、本章では、市販ソフト (Optimus) における Normal-Boundary Intersection 法 (NBI 法) を用いた。

多目的最適化を行うことによりパレート最適解が得られる。パレート最適解とは、優劣が付けられない解の集合すなわち、目的関数値の一方を改善させようとした場合、他の目的関数の値が改悪されてしまうような状態の解の集合であり、評価項目間のトレードオフ関係を表すものである。パレート最適解集合の例を図 5-2 に示す。設計過程においては、このトレードオフ関係を踏まえたうえで、限定された制約条件のもとで設計目標を達成する設計代替案を選択することをいかに支援するかが重要であり、トレードオフ分析手法<sup>(14)</sup>として研究がなされている。

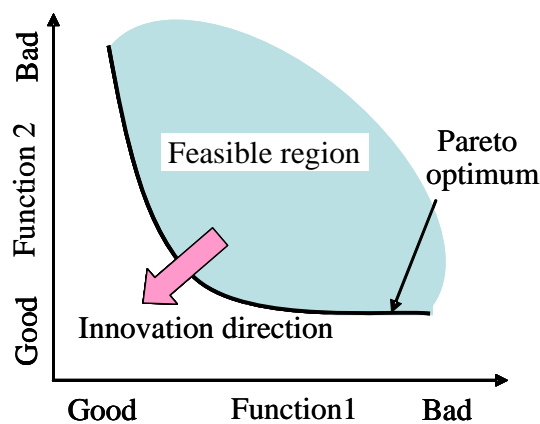


Fig. 5-2 Example of Pareto optimum solution set

トレードオフ分析は、代替設計案を比較し、どの設計変数や制約条件がパレート最適解を支配しているのかを調べ、パレート最適解における設計変数と評価項目との関係を把握することである。それにより、設計の最終目的である設計変数の値を決めることができ、さらには、その製品の設計問題の本質を理解することによりブレイクスルーの方向性を見出すことにも繋がるものである。

### 5.2.3 製品の使用条件による最適解への影響

ライフサイクルを考慮して目的関数を評価する場合、製品の使用における環境条件を想定しておく必要がある。それは、どのような使用条件を設定するかによって製品の最適設計解が変わってくるからである。使用条件のパラメータの例としては、使用期間、使用頻度、使用対象（航空機や鉄道車両などの輸送機械の場合は乗客数の定員、産業用機械の場合は取り扱う製品の大きさや種類、量など）、メンテナンス方法、運用経費（電力単価、燃料単価、人件費）などである。想定していない使用条件で製品を使うと最適解の保証ができないため、使用条件はできるだけ正確に想定してパラメータとして設定しておく必要がある。しかし、使用条件が想定していたものから多少変動したとしても、評価項目の無駄が大きくなるように設計する手法（ロバスト設計）も研究されており<sup>(15)(16)</sup>、それらを組み合わせることで使用条件の変更にも対応した設計ができるようになる。

また、製品の使用条件は使用期間の間常に一定というわけではなく、変化する使用条件に対して製品の組み合わせを考える必要性もある。いろいろな使用条件が想定される場合に、対応範囲の広い製品を1台用いるか、対応範囲は狭いがある条件下ならば最適である製品を複数台使い分けて用いるかといった選択肢がありえる。また、コンポーネントを取替えて対応範囲を変更することができる場合には、コンポーネントの組み合わせを考慮する必要がある。

このように使用条件を想定し、設計時にライフサイクルを通したシミュレーションを行って評価項目を定量的に把握しておくことにより、より最適な製品を設計することができるのである。

### 5.3 適用例

#### 5.3.1 モデル構造と設計変数

本章では適用例として立型フライス盤を対象とし，その主要構造を図 5-3 のようにモデル化した．このフライス盤モデルは梁の部材 5 つとテーブルとモータによって構成されている．梁の部材の断面は一边  $d_i$ [m] の正方形，長さは  $L_i$ [m] とし ( $i=1,2,3,4,5$ :  $i$  は部材番号に対応)，テーブルは幅  $L_6$ [m]，奥行  $0.5 \cdot L_6$ [m]，厚さ  $0.2 \cdot L_6$ [m]，モータは 5[kg] の質点のみと仮定した．

工作機械の主な製品機能は加工精度である．加工精度を表す評価項目としては，静剛性，耐熱性，耐久性，振動特性などがあるが，本モデルにおいては静剛性を用いた．静剛性は，図 5-3 に示すように，切削点の上下にそれぞれ  $x$  軸に平行な逆方向きの 1.0N の力を加えた場合の  $x$  方向の変位（静コンプライアンス  $F_s$  [m/N]）の逆数であるので，製品性能は静コンプライアンスによって評価する．ここで力の加える向きを  $x$  軸方向としたのは，このモデルにおいては  $x$  軸方向， $y$  軸方向， $z$  軸方向の剛性の中で  $x$  軸方向の剛性が最も低いためである．評価項目は，製品機能  $F_s$  のほかにライフサイクルコスト  $C_{total}$  と環境影響  $EI_{total}$  を用いる．ただし本適用例では，ライフサイクルとしては製造，使用，再生，廃棄の段階を考慮する．また，最適化の際の設計変数は，各部材の正方形断面一边の長さ  $d_i$ ，各接合部の接合面最大表面粗さ  $R_{max,j}$  [ $j=1,2,3,4,5,6$ :  $j$  は接合部番号に対応]，各部材の長手方向の長さ  $L_i$ [m]，部材に用いる材質の種類，および部材の断面形状とする．設計変数の制約条件は， $d_{min} \leq d_i \leq d_{max}$ ， $10^{-7} \leq R_{max,j} \leq 10^{-4}$  とした．

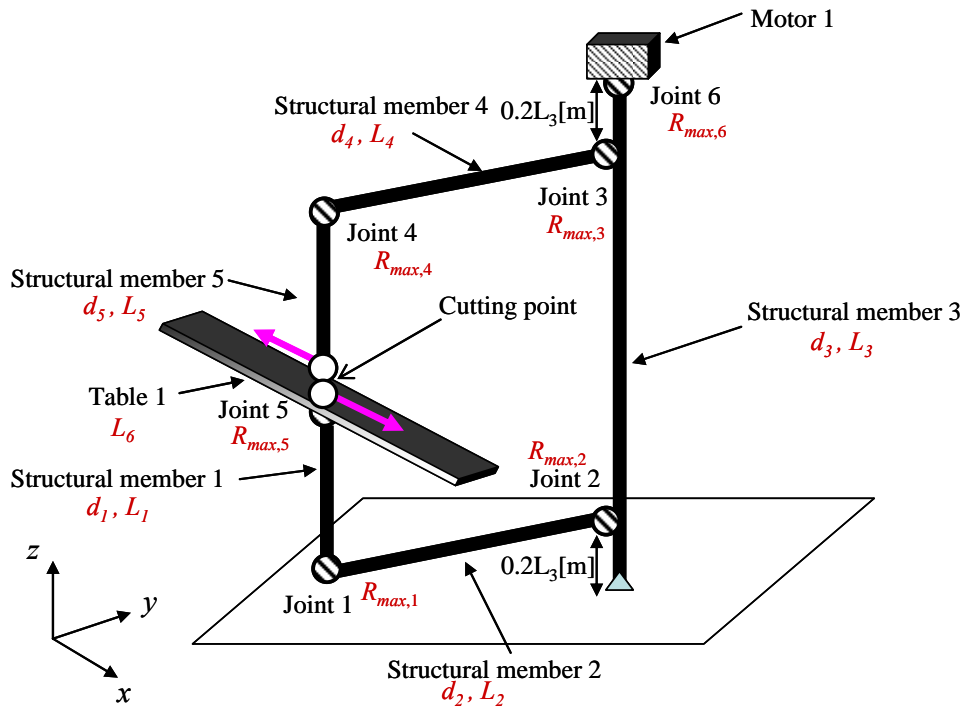


Fig. 5-3 Milling machine structure

### 5.3.2 評価項目の定式化

#### (1) 静コンプライアンス

静コンプライアンス  $F_s$  は部材による影響と結合部による影響に分けられる。切削点に  $P$  N の力を加えたときの部材の影響による切削点の変位  $\delta_1$  は、カスチリアーノの定理により次式のように表される。

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{\partial U_1}{\partial P} \\ &= P \cdot \left( \frac{L_1^3}{3EI_1} + \frac{L_2^3}{3EI_2} + \frac{L_1^2 \cdot L_2}{2GI_2} + \frac{L_2^2 \cdot L_3}{2GI_3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{L_3^3}{3EI_3} + \frac{L_4^3}{3EI_4} + \frac{L_4 \cdot L_5^2}{2GI_4} + \frac{L_5^3}{3EI_5} \right)\end{aligned}\quad (5.4)$$

ここで、 $U_1$  は部材のひずみエネルギー、 $E$ 、 $G$  はそれぞれ部材の材料の縦弾性係数と横弾性係数、 $I_i$  は各部材断面の断面二次モーメントである。

一方、結合部の影響による切削点の変位  $\delta_2$  は、Kragelskii の接触理論<sup>(17)</sup>を用いると、同様にカスチリアーノの定理より次式のように表される。

$$\begin{aligned}\delta_2 &= \frac{\partial U_2}{\partial P} \\ &= P \cdot \left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{L_1^2}{K'_1} + \frac{L_1^2}{K'_2} + \frac{L_5^2}{K'_3} + \frac{L_5^2}{K'_4} \right)\end{aligned}\quad (5.5)$$

ここで、 $U_2$  は結合面のひずみエネルギー、 $K_j$ 、 $K'_j$  はそれぞれ Kragelskii の接触理論より求められた各結合部面の軸方向と軸回りの等価バネ剛性である。以上より、1N の力を加えたときの変位である静コンプライアンス  $F_s$  [m/N] は、次式のように表される。

$$\begin{aligned}F_s &= \frac{\delta_1 + \delta_2}{P} \\ &= \frac{L_1^3}{3EI_1} + \frac{L_2^3}{3EI_2} + \frac{L_1^2 \cdot L_2}{2GI_2} + \frac{L_2^2 \cdot L_3}{2GI_3} \\ &\quad + \frac{L_3^3}{3EI_3} + \frac{L_4^3}{3EI_4} + \frac{L_4 \cdot L_5^2}{2GI_4} + \frac{L_5^3}{3EI_5} \\ &\quad + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{L_1^2}{K'_1} + \frac{L_1^2}{K'_2} + \frac{L_5^2}{K'_3} + \frac{L_5^2}{K'_4}\end{aligned}\quad (5.6)$$

#### (2) ライフサイクルコスト

全ライフサイクルコスト  $C_{total}$  は、製造費  $C_{manufacture}$ 、使用費  $C_{use}$ 、廃棄費  $C_{disposal}$ 、再生費  $C_{recycle}$  の和で表す。

$$C_{total} = C_{manufacture} + C_{use} + C_{disposal} + C_{recycle} \quad (5.7)$$

製造費は、材料費  $C_M$  と加工費  $C_J$  の和とする。

$$C_{manufacture} = C_M + C_J \quad (5.8)$$

材料費  $C_M$  は、フライス盤の構成部材の質量  $M$  と材料の単位質量あたりの購入単価  $c$  との積によって計算する．よって材料費の総和は、

$$C_M = c \times M \quad (5.9)$$

と表される．ここで、構成部材の質量  $M$  は質量密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] と体積の積として次式で表される．

$$M = \rho \times \left\{ \sum_i^5 (d_i^2 \cdot L_i) + L_6 \cdot 0.5L_6 \cdot 0.2L_6 \right\} \quad (5.10)$$

加工費  $C_J$  は、フライス盤自体を作成する際に、構成部材同士を結合するために接合面を加工するのにかかるコストである．本適用例においては、各部材の接合面における表面粗さ(最大高さ)  $R_{\max}$  と単位面積あたりの加工費  $U_u$  との関係を、代表的な表面加工方法のコストをもとに次式のように表して<sup>(18)</sup>、これを用いた．

$$U_{uj} = 42900 \times R_{\max,j}^{-0.2288} \quad (5.11)$$

これにより加工費は、次式のように表される．

$$C_J = \sum_{j=1}^4 (U_{uj} \times d_j \times d_{j+1}) \quad (5.12)$$

次に、使用費  $C_{use}$  は運転にかかる電気料金（電力費） $C_E$  のみとする．すなわち、

$$C_{use} = C_E \quad (5.13)$$

ここでいう電力費  $C_E$  とは、ライフサイクルの使用の段階において、フライス盤を用いてある部品を 10 年間加工し続けた場合にかかる電気料金とする．電気料金は、以下のように消費電力量  $P$  に電気料金単価  $C_e$  をかけて換算して求める．

$$C_E = C_e \times P \quad (5.14)$$

ここで消費電力量  $P$  を求めるためには、成田らが提案した電力量予想モデル<sup>(19)(20)</sup>を使用して、加工パス、部材断面寸法、本体サイズ、材質の密度を代入することによって計算した．その際の移動質量としては、 $x$  軸方向の移動時にはテーブルの質量、 $y$  軸方向の移動時にはテーブルと部材 1 の質量、 $z$  軸方向の移動時には部材 5 の質量がそれぞれ相当すると考えた．電力量の計算において用いた定数は以下の通りである．

- ・摺動面摩擦係数： $\mu = 0.01$
- ・ボールねじの伝達効率： $\eta = 0.95$
- ・ボールねじのリード： $l_x = 0.02$  [m],  $l_y = 0.02$  [m],  $l_z = 0.016$  [m]
- ・一刃当りの送り量： $s_t = 0.04$  [mm/tooth]
- ・送り速度： $f = 200$  [mm/min]
- ・モータの回転数： $n = 2500$  [rpm]
- ・電気料金単価： $C_e = 10$  [yen/kWh]

廃棄の段階の費用  $C_{disposal}$  は、フライス盤に使用した部材の質量の内の廃棄する質量  $M_{dis}$  と、その材質の単位質量あたりの廃棄にかかる単価  $c_{dis}$  をもとに評価する．すなわち、

$$C_{disposal} = c_{dis} \times M_{dis} \quad (5.15)$$

使用済み材料をリサイクルし再生材料とするには費用がかかるが、本適用例では、材料



が再生可能な場合は、再生した材料はすべて製造の段階にまわり新たな製品の製造に使われ、また製造時に使用する材料は全て再生した材料を用いると仮定する。従って、再生の段階にかかる費用  $C_{recycle}$  は製造段階の材料費に含まれると考え、再生段階の独自のコストはゼロとする。すなわち、

$$C_{recycle} = 0 \quad (5.16)$$

尚、リサイクルできないような材料の場合は、再生費用自体が発生しない。

### (3) 環境影響

環境影響度の算出は Eco-indicator 99 を用いて行い、環境影響  $EI_{total}$  は、製造、使用、廃棄、再生の各段階における影響度の合計とする。ここでは、保守の段階は無視した。

$$EI_{total} = EI_{manufacture} + EI_{use} + EI_{disposal} + EI_{recycle} \quad (5.17)$$

製造の段階の環境影響  $EI_{manufacture}$  はフライス盤に使用する部材の質量のうち再生品ではない新しい材料の質量と材質をもとに評価する。

$$EI_{manufacture} = IND_{new} \times M_{new} \quad (5.18)$$

ここで、 $IND_{new}$  は材質の単位質量あたりの新規の生成にかかる係数[point/kg: 以下同様]、 $M_{new}$  はフライス盤に使用する部材の質量のうち再生品ではない新しい材料の質量である。使用の段階の環境影響  $EI_{use}$  は、消費する総電力量をもとに評価する。

$$EI_{use} = IND_{electricity} \times P \quad (5.19)$$

ここで、 $IND_{electricity}$  は単位電力量あたりの使用にかかる係数、 $P$  は使用段階で消費する総電力量であり、 $IND_{electricity} = 0.027$  [point/kWh]とした。

廃棄の段階の環境影響  $EI_{disposal}$  は、フライス盤に使用した部材の質量のうち廃棄する質量とその材質をもとに評価する。

$$EI_{disposal} = IND_{dis} \times M_{dis} \quad (5.20)$$

ここで、 $IND_{dis}$  は材質の単位質量あたりの廃棄にかかる係数、 $M_{dis}$  はフライス盤に使われた質量のうち廃棄する質量である。

再生の段階の環境影響  $EI_{recycle}$  は、フライス盤に使用した部材の質量のうち再生する質量とその材質をもとに評価する

$$EI_{recycle} = IND_{rec} \times M_{rec} \quad (5.21)$$

ここで、 $IND_{rec}$  は材質の単位質量あたりの再生にかかる係数、 $M_{rec}$  はフライス盤に使われた質量のうち再生する質量である。

### 5.3.3 加工条件の設定

電力費を算出する際に同一部品を 10 年間加工し続けるとしたが、加工するワークピースによって提案する設計法のメリットや最適設計解が異なる。その違いを考察するために、ワークピースに関してサイズと加工パスを以下のように設定した。

(1) ワークピースのサイズ

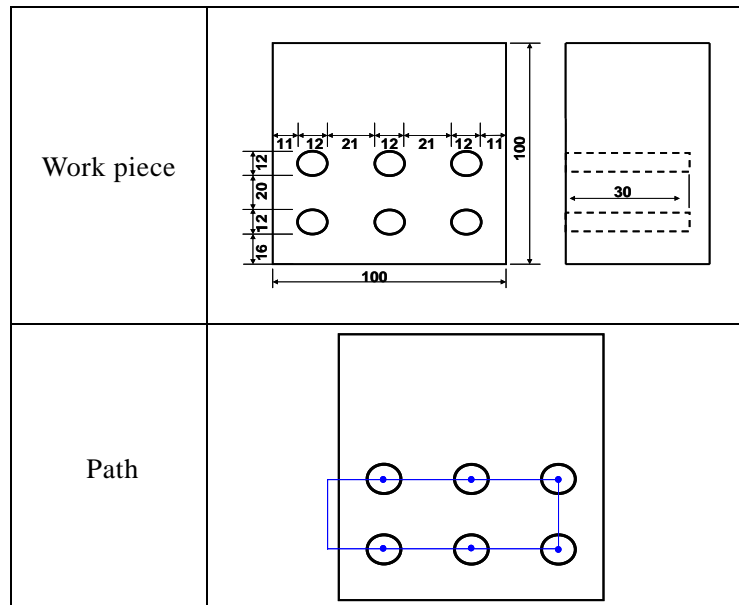
ワークピースのサイズを表 5-1 のように S, M, L の 3 種類設定した．ワークピースは直方体の鋳物で形状は相似とし，一辺の長さの比は  $S : M : L = 1 : 2 : 3$  である．また，ワークピースのサイズに合わせて，加工に使うエンドミルの半径  $R$  も表 5-1 の通り設定した．

**Table 5-1** Work piece and tool sizes

Work piece size	S	M	L
$x$ [mm]	100	200	300
$y$ [mm]	100	200	300
$z$ [mm]	50	100	150
$R$ [mm]	6	12	18

(2) 加工パス

加工部の形状と加工パスを図 5-4 に示す．図中の数値はワークサイズ S の場合の寸法 [mm] である．ワークサイズ M, L の場合はそれぞれの数値は 2 倍, 3 倍となる．この加工パスは， $x$  方向， $y$  方向の割合が少なく， $z$  方向の割合が多くなるように設定した．このように設定したのは，加工方向によって消費エネルギーに対する質量の影響が異なるためである． $x$  方向はテーブルのみの移動のため，設計変数である部材寸法の変化には無関係であり， $y$  方向は移動質量に部材 1 を含むが，摩擦係数を介しているために部材寸法の変化に対してほとんど影響を受けない．一方， $z$  方向は移動質量に部材 5 を含み，鉛直方向のために摩擦係数を介さないので部材寸法の変化に対して大きな影響を受ける．これらのことを考慮して，加工パスを設定したものである．



**Fig. 5-4** Illustration of machining path

### 5.3.4 離散変数の設定

本適用例では、部材断面の一边を連続変数の設計変数とし、本体構成部材の材質、部材の断面形状、本体の大きさを表す部材の長手方向の長さを離散変数の設計変数とした。これらの離散変数の設定について以下に述べる。

#### (1) 部材の材質

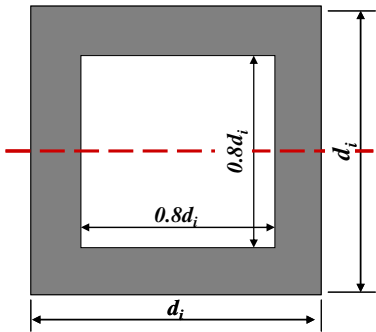
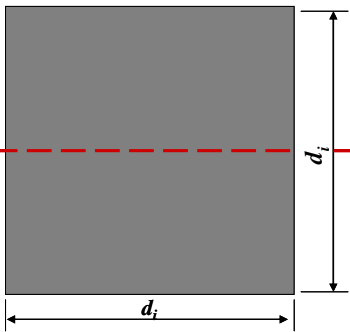
部材材質の比較のため、表 5-2 のように 4 種類の材質を設定した。本適用例では材料特性として質量密度  $\rho$ 、縦弾性係数  $E$ 、横弾性係数  $G$ 、購入単価  $c$  を用い、環境影響の係数は Eco-indicator 99 を参照した。鋼、鋳鉄、アルミニウム合金はリサイクル率を 100% とし、使用済みの材料は全て再生処理して、製造時に使用する材料は全て再生材料を使うこととした。他方、アルミナセラミックはリサイクル率を 0% とし、使用済みの材料は全て埋め立て処理し、製造時に使用する材料は全て新規に生成した材料を使うものとした。アルミナセラミックは実際には工作機械に使われることはないが、ここでは、軽量、高剛性、高価格、材料リサイクル不可という特性を持つ材質の代表として用い、単価は高価格ということ considering して設定した。アルミナセラミックの購入単価は、仮定の数値である。

**Table 5-2** Material properties and data related to the cost and environmental impact

	Steel	Cast iron	Aluminum alloy	Alumina ceramic
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7835	7200	2680	3800
$E$ [Pa]	$2.00 \times 10^{11}$	$1.00 \times 10^{11}$	$7.60 \times 10^{10}$	$3.43 \times 10^{11}$
$G$ [Pa]	$8.08 \times 10^{10}$	$4.00 \times 10^{10}$	$2.86 \times 10^{10}$	$1.37 \times 10^{11}$
$c$ [yen/kg]	70	30	250	500
$c_{dis}$ [yen/kg]	40	40	40	40
$IND_{new}$ [point/kg]	0.094	0.240	0.780	0.028
$IND_{dis}$ [point/kg]	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
$IND_{rec}$ [point/kg]	0.024	0.024	0.060	-
Recycling rate	100%	100%	100%	0%

#### (2) 部材の断面形状

部材の断面形状の比較のため、図 5-5 のように正方形中空断面と正方形中実断面の 2 種類を設定した。中空断面は肉厚を外側の寸法（設計変数）の 10% とした。断面が中空化されると質量、断面二次モーメントともに減少するが、断面二次モーメントは質量の減少ほどには減少しない。今回の事例においては、質量の 64% 減少に対して断面二次モーメントは約 50% の減少にとどまっている。そのため、材料費あたりの剛性は中空断面の方が優れていることになる。

	Hollow	Solid
Shape patterns		
Cross section	$d_i^2 (1 - 0.8^2)$	$d_i^2$
$I_i$	$\frac{d_i^4}{12} (1 - 0.8^4)$	$\frac{d_i^4}{12}$

**Fig. 5-5** Cross-sections of structural member

### (3) 本体のサイズ

工作機械本体のサイズは加工する品物のサイズによって最適な値が決まるので，ワークピースのサイズと対応するように S, M, L の本体サイズを表 5-3 に示すようにそれぞれ設定した．また，それらの場合の設計変数としての断面寸法の範囲は，表 5-3 に示すように静コンプライアンス値の範囲が等しくなるように設定した．

**Table 5-3** Structural size and range of design variables

Structural size	S	M	L
$L_1[\text{m}]$	0.15	0.30	0.45
$L_2[\text{m}]$	0.50	1.00	1.50
$L_3[\text{m}]$	0.70	1.40	2.10
$L_4[\text{m}]$	0.50	1.00	1.50
$L_5[\text{m}]$	0.25	0.50	0.75
$L_6[\text{m}]$	0.50	1.00	1.50
$d_{min}[\text{m}]$	0.03	0.05	0.07
$d_{max}[\text{m}]$	0.12	0.20	0.27

ただし，ワークピースのサイズにはそれを加工できる本体サイズの対応範囲があり，それをまとめると表 5-4 のようになる．図中の◎は最適な組み合わせ，○は最適ではないが加工可能な組み合わせ，×は加工不可能な組み合わせを表している．

**Table 5-4** Applicable structural and work piece sizes

		Structural size		
		S	M	L
Work piece size	S	◎	○	○
	M	×	◎	○
	L	×	×	◎

以上の設定の下で最適化計算を行った。解析の結果は次節で述べる。

## 5.4 解析結果と考察

### 5.4.1 新設計法の利点の分析

まず、製造費のみを考慮した最適設計法（以下旧設計法と呼ぶ）とライフサイクルコストを考慮した最適設計法（以下新設計法と呼ぶ）の比較を行う。多目的最適化計算においては、旧設計法は製造費と静コンプライアンスを目的関数に設定し、新設計法はライフサイクルコストと静コンプライアンスを目的関数に設定した。本適用例においては、静コンプライアンス、ライフサイクルコスト、環境影響の3つの目的関数を設定したので本来は三目的最適化問題となる。しかし、本適用例のモデル化において、環境影響として使用の段階の消費電力を換算したものをを用いていることと、使用の段階に比べ他の段階の環境影響が非常に小さいことから、使用費と環境影響がほぼ比例し、ライフサイクルコストと環境影響が競合しないのでこれら3つの目的関数が競合する関係とはならない。そこで、トレードオフ分析を簡単にする意味で、最適化は静コンプライアンスとライフサイクルコストの二目的で行い、その最適解を用いて環境影響を算出して評価することとした。

以上の設定のもとに、新旧の設計法でのパレート最適解を求めた。図 5-6 に静コンプライアンスとライフサイクルコストとのパレート最適解を、図 5-7 に静コンプライアンスと環境影響とのパレート最適解を示す。ただし、材質は鋼、本体サイズは S、ワークピースのサイズは S とし、加工パスは 5.3.3 節の図 5-4 で示したものをを用いた。

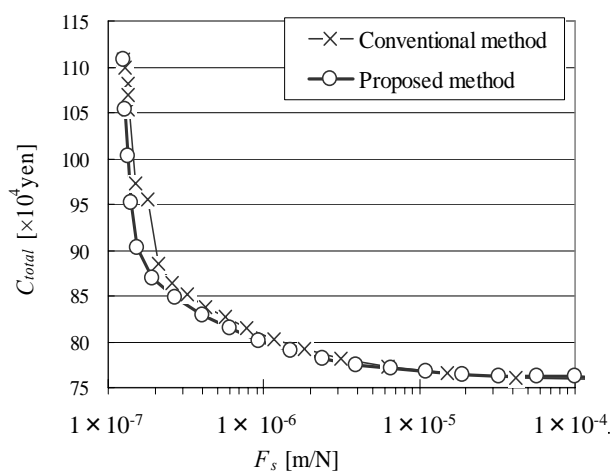


Fig. 5-6 Total lifecycle cost

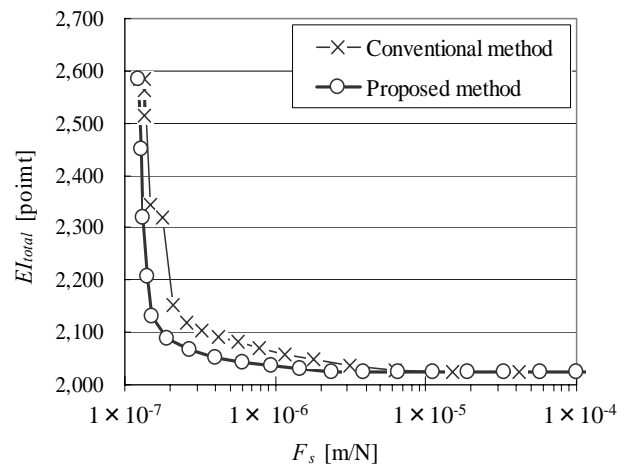


Fig. 5-7 Total environmental impact

次に、このパレート最適解における静コンプライアンスと設計変数（部材断面寸法）との関係をそれぞれ図 5-8、図 5-9 に示す。

図 5-6、図 5-7 のパレート最適解のグラフから、新設計法が旧設計法に対して、トータルのライフサイクルコストと環境影響の両面で、より望ましい解が得られているのが分かる。この差を具体的に調べるために、静コンプライアンスの値が  $1 \times 10^{-6}$  [m/N] における各段階のコストと環境影響、その時の設計変数  $d_4$ 、 $d_5$  の値を抜き出したものを表 5-5 に示す。

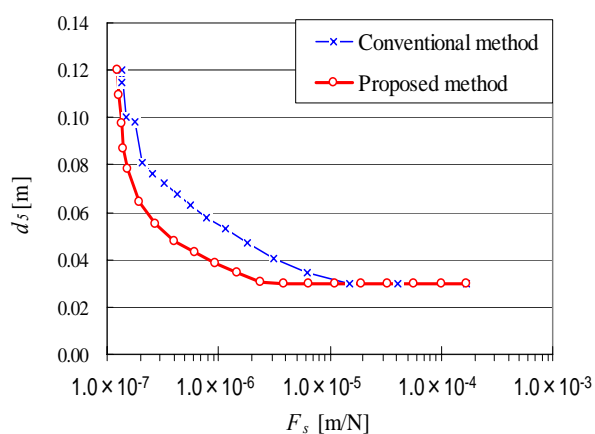


Fig. 5-8 Design variable  $d_5$

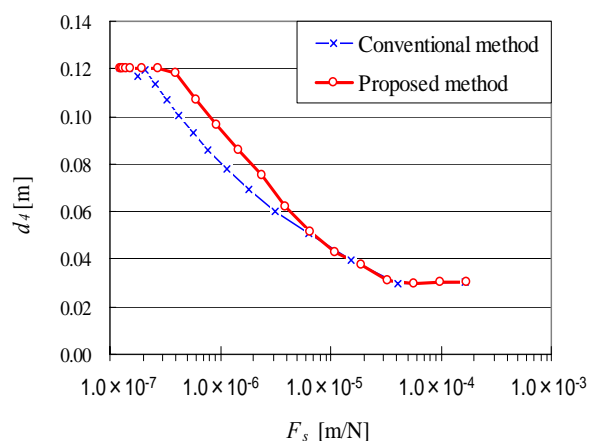


Fig. 5-9 Design variable  $d_4$

Table 5-5 Lifecycle cost, environmental impact and design variables  
for Conventional and Proposed methods

	Conventional method	Proposed method
$C_{\text{manufacture}} [\times 10^4 \text{yen}]$	4.2	4.9
$C_{\text{use}} [\times 10^4 \text{yen}]$	76.1	75.2
$C_{\text{disposal}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0
$C_{\text{recycle}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0
$C_{\text{total}} [\times 10^4 \text{yen}]$	80.3	80.1
$EI_{\text{manufacture}} [\text{point}]$	0.0	0.0
$EI_{\text{use}} [\text{point}]$	2055.1	2031.4
$EI_{\text{disposal}} [\text{point}]$	0.0	0.0
$EI_{\text{recycle}} [\text{point}]$	3.9	4.4
$EI_{\text{total}} [\text{point}]$	2059.0	2035.8
$d_4 [\text{m}]$	0.078	0.097
$d_5 [\text{m}]$	0.053	0.039

まずコストについては、製造費の点では製造費の最小化を目的としている旧設計法が優れているのに対し、使用費の点ではトータルライフサイクルコストの最小化を目的としている新設計法が優れている。次に、環境影響については、再生の段階では、材料の質量の最小化を目的としている旧設計法が優れているが、表 5-5 に示すように使用の段階の環境影響  $EI_{\text{use}}$  は再生の段階の環境影響  $EI_{\text{recycle}}$  より約 500 倍大きい。このことから、本モデルにおいては使用の段階の影響度が非常に大きいことが分かる。

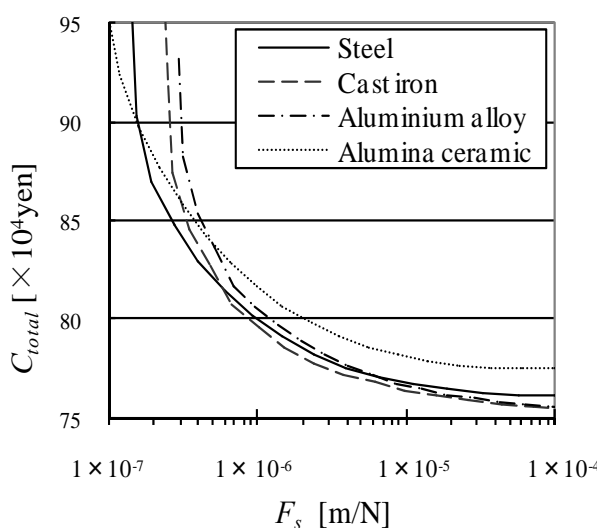
また、設計変数である部材断面の一辺の寸法については、新設計法のパレート最適解は旧設計法に比べ、同じ静コンプライアンスにおいて可動部の断面の寸法である  $d_5$  は小さく、固定部の断面の寸法である  $d_4$  は大きくなっている。これは、可動部の質量は消費電力に関係しているため、電力費を下げるためには、可動部をより軽く固定部をより重くする必要があるからである。その結果、同じ静コンプライアンス値を維持した状態で電力費の低減を実現することができたと言える。

### 5.4.2 離散変数の変更によるパレート解の改良

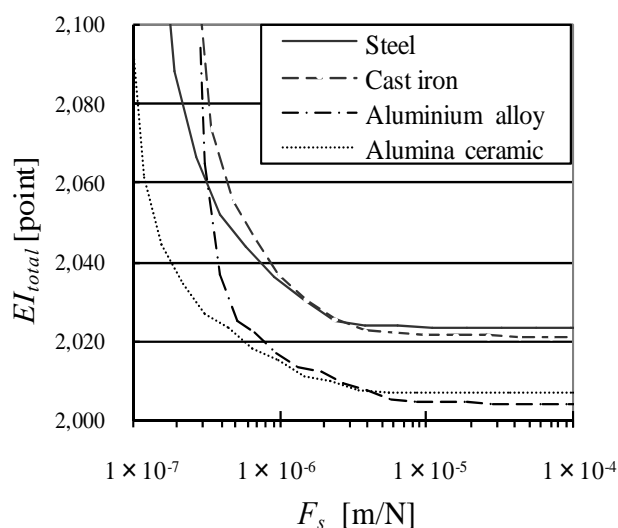
本適用例では、部材断面の一辺を連続変数、材質、断面形状、本体サイズを離散変数としているが、ここでは離散設計変数の変更によるパレート解の改良に関して考察を行う。

#### (1) 材質の変更

まず、工作機械本体の材質の変更について考察する。各材質を用いて作られた工作機械を使って加工する場合の静コンプライアンスと全ライフサイクルコストとのパレート最適解を図 5-10 に、静コンプライアンスと全環境影響とのパレート最適解を図 5-11 にそれぞれ示す。ただし、ワークピースサイズは S、本体サイズは S とした。



**Fig. 5-10** Total lifecycle cost  
for several materials



**Fig. 5-11** Total environmental impact  
for several materials

ライフサイクルコストは、図 5-10 から分かるように、静コンプライアンスの値によって最適な材質が異なる。例えば静コンプライアンスの値が  $1 \times 10^{-6}$  [m/N] においては、ライフサイクルコストが低い順に鋳鉄、鋼、アルミ合金、アルミナセラミックとなっている。一方、環境影響は、図 5-11 から分かるように、静コンプライアンスの値が  $1 \times 10^{-6}$  [m/N] においては、少ない順にアルミナセラミック、アルミ合金、鋼、鋳鉄になっている。これらの理由を調べるために、静コンプライアンスが  $1 \times 10^{-6}$  [m/N] における各段階のコストと環境影響の値を抜き出したものを表 5-6 に示す。

製造費の低い順はライフサイクルコストが低い順と同様に、鋳鉄、鋼、アルミ合金、アルミナセラミックの順になっている。これは材料単価の低さが効いているためである。一方、使用費は低密度の材質が小さいが、材質による差は製造費ほど大きくはない。それは、使用費は、加工条件のみによって決まる割合が大きく、材質によって決まる割合が小さいためである。その結果、使用費を含めた数字で見ても、トータルコストの順位は製造費の順位と変わらなかった。しかしながら、製造費における差とトータルコストにおける差は



異なっており，構造や加工条件あるいは材質パラメータによっては使用費の差が大きくなり，トータルコストに大きな影響を及ぼすことは十分起こりうるので，使用費を考慮する意義は大いにあるといえる．

**Table 5-6** Lifecycle cost and environmental impact for several materials

	Steel	Cast iron	Aluminum alloy	Alumina ceramic
$C_{\text{manufacture}} [\times 10^4 \text{yen}]$	4.9	4.3	6.1	7.4
$C_{\text{use}} [\times 10^4 \text{yen}]$	75.2	75.2	74.5	74.5
$C_{\text{disposal}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0	0.0	0.3
$C_{\text{recycle}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0	0.0	0.0
$C_{\text{total}} [\times 10^4 \text{yen}]$	80.1	79.5	80.6	81.9
$EI_{\text{manufacture}} [\text{point}]$	0.0	0.0	0.0	1.6
$EI_{\text{use}} [\text{point}]$	2031.4	2031.3	2011.8	2005.4
$EI_{\text{disposal}} [\text{point}]$	0.0	0.0	0.0	0.1
$EI_{\text{recycle}} [\text{point}]$	4.9	5.7	5.3	0.0
$EI_{\text{total}} [\text{point}]$	2036.3	2037.0	2017.1	2007.1
Mass[kg]	204.7	239.1	89.1	84.0

また，本適用例では製品性能の評価項目に静コンプライアンスを用いたため，材質特性としては質量密度，縦弾性係数，横弾性係数を考慮したが，実際の工作機械の評価項目としてはその他にも耐久性や耐熱変形性などがあり，それら进行评估する場合は，引張強度，熱伝導率，熱膨張係数などの他の材質特性を考慮する必要がある．

次に環境影響について見ると，表 5-6 に示すように，材料に関する環境影響 ( $EI_{\text{manufacture}} + EI_{\text{recycle}}$ ) はアルミナセラミックが最も低い．これはリサイクルをしないため  $EI_{\text{recycle}}$  の値がゼロであることと，低密度であるために質量が小さいことおよび  $IND_{\text{new}}$  値が小さいため  $EI_{\text{manufacture}}$  の値が小さいためである．一方，同様に低密度のアルミ合金は，5.3.4 節の表 5-2 に示すように材料の再生時の環境影響の係数  $IND_{\text{rec}}$  が大きいこと，密度の大きい鋼，鋳鉄と同程度の環境影響の値になっている．なお，鋼，鋳鉄，アルミ合金は 100% 再生材料を使用するとしたが，新たに生成した材料を使う場合は，表 5-2 の係数値から環境影響がそれぞれ 4 倍，10 倍，13 倍となる．また，アルミナセラミックは埋め立て廃棄するとしたが，その影響は使用の段階に比べて非常に小さい．さらに使用の段階の環境影響もアルミナセラミックが最も小さい．その理由としては，低密度かつ高剛性であるために同じ剛性値では可動部の質量が小さく，従って消費電力量が小さくなったのである．その結果，アルミナセラミックの環境影響がライフサイクル全体として最小になったといえる．しかし，本モデルでは製造における環境影響に関しては，使用する材料の質量しか考慮しておらず，加工などの製造段階におけるその他の要因は考慮していない．単に材料の製造に関わる環境影響が小さくても加工しにくい材質の場合には，製造の環境影響が大きくなり最適な材料ではなくなる可能性がある．

以上の結果より，最適材質の改良を実現するためには，全ての特性が改善された材質である必要はなく，どれか一つの特性が改良された材質であっても，その目的に応じた適切な

評価方法を選ぶことにより，他の特性との関係の中で最適解の改良をもたらすことができるということができる。

## (2) 断面形状の変更

断面形状を中実断面から中空断面に変えた場合の結果を図 5-12，図 5-13 に示す．なお，この計算では材質は鋼，ワークピースサイズは S，本体サイズは S とした．

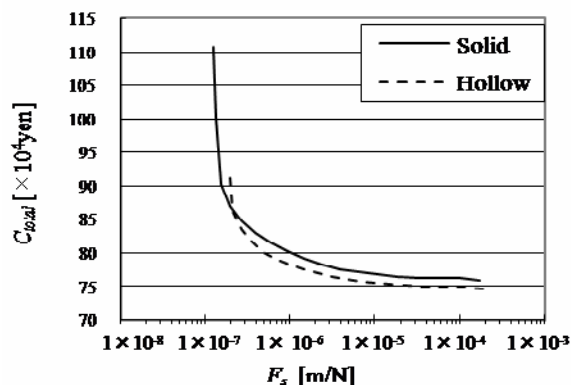


Fig. 5-12 Total lifecycle cost for two section patterns

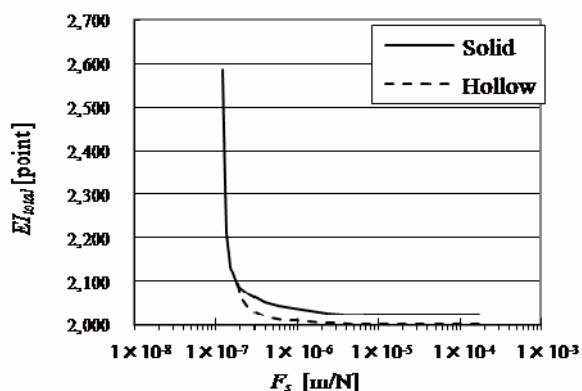


Fig. 5-13 Total environmental impact for two section patterns

これらの図より，ライフサイクルコストと環境影響の両面において，静コンプライアンスの値が  $2 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4}$  の広い範囲で中空断面が， $1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$  の範囲では中実断面が優れている．しかし，後者は(1)の材質の変更のところで述べたことと同じで，設計変数の上限によるものであるので，それを除けば全般的に中空断面が優れていることが確認できる．ライフサイクルコストにおけるこの要因を調べるために，パレート最適解における製造費，使用費を抜き出してそれぞれ図 5-14，図 5-15 に示した．

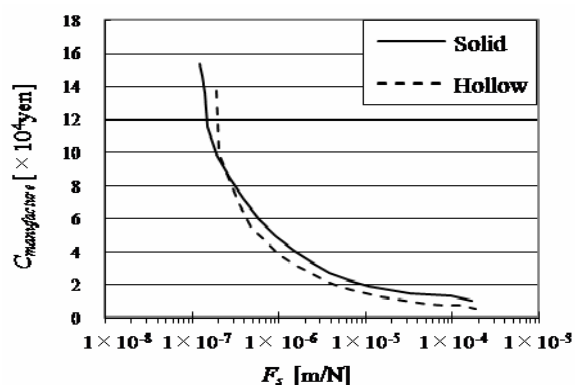


Fig. 5-14 Manufacturing cost for two section patterns

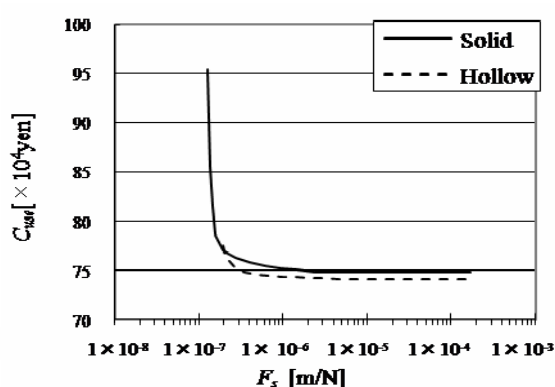


Fig. 5-15 Usage cost for two section patterns

これらの図より，製造費，電力費ともに中空断面のほうが優れていることが確認できる．

これは、中空断面は中実断面に比べ断面積あたりの剛性が高いので、同じ静コンプライアンスでは中空断面の方が断面積は小さくなり、部材の質量が軽くなって材料費、使用費が安く済むためである。同様の理由で図 5-13 より環境影響も小さくなっている。このように、断面形状の変更は、製造費だけでなく、使用費やそれに関連している環境影響においても最適解の改良をもたらすものであることが分かる。

なお、本適用例では断面を中空化した場合と、弾性係数を  $1-0.8^4 (= 0.5904)$  倍、質量密度を  $1-0.8^2 (= 0.36)$  倍した材質を用いた中実断面の場合とは等価のモデルとなっている。

### (3) 工作機械の本体サイズの変更

次に、本体サイズの変更について考察する。設計時において工作機械の本体サイズを選択する場合、加工するワークピースのサイズによって最適なものが異なる。ワークピースのサイズが一種類に決まっている場合は、当然のことながらそのサイズに合った本体サイズを選ぶことが最適となる。しかし、実際の生産においては、同じサイズのワークピースのみを加工し続けることはほとんどなく、通常はさまざまなサイズのワークピースを加工しなければならない。そこで、表 5-3 に示した本体サイズの工作機械を用いて複数のサイズのワークピースを加工する場合について考える。尚、ここでは本体の材質は鋼とする。

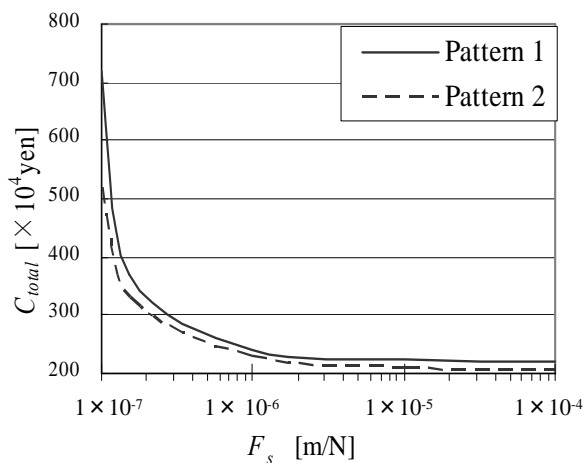
複数のサイズのワークピースを加工する場合を調べるため、ワークピースのサイズの組み合わせ（以下、タスクパターンと呼ぶ）を表 5-7 のように二種類設定した。

**Table 5-7 Structural size patterns**

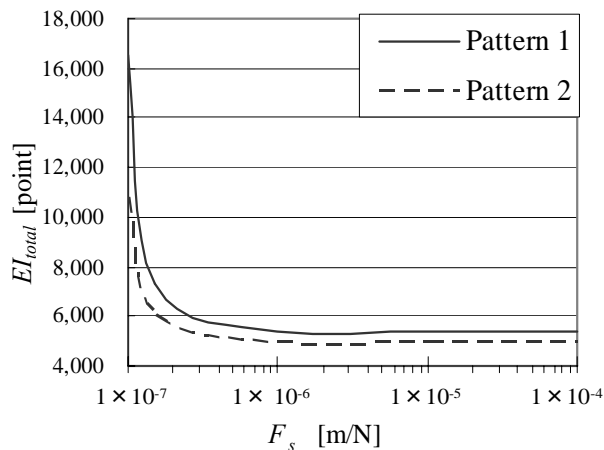
Task pattern (i)	Work size	S(1/2)		L(1/2)	
	Structural size pattern 1	L			
	Structural size pattern 2	S		L	
Task pattern (ii)	Work size	S(1/3)	M(1/3)	L(1/3)	
	Structural size pattern 1	L			
	Structural size pattern 2	S	L		
	Structural size pattern 3	M			L
	Structural size pattern 4	S	M	L	

タスクパターン(i)は加工期間 10 年のうち 1/2 は S サイズのワークピースを加工し、残りの 1/2 は L サイズを加工するという条件である。タスクパターン(ii)は加工期間 10 年のうち 1/3 は S サイズを加工し、次の 1/3 は M サイズを加工し、残りの 1/3 は L サイズを加工するという条件である。タスクパターン(i), (ii)に対し加工に用いる本体サイズの最適な使い分けの組み合わせ（本体サイズパターン）の候補は、表 5-7 に示すようにタスクパターン(i)では 2 通り、タスクパターン(ii)では 4 通りとなる。まず、タスクパターン(i)において、表 5-7 の本体サイズパターンを用いた場合の静コンプライアンスとライフサイクルコストとのパレート最適解を図 5-16 に、静コンプライアンスと環境影響とのパレート最適解を図

5-17 にそれぞれ示す．これらの図から本体サイズパターン 2 がコストと環境影響の両面でより優れていることが分かる．



**Fig. 5-16** Total lifecycle cost for Task pattern (i)



**Fig. 5-17** Total environmental impact for Task pattern (i)

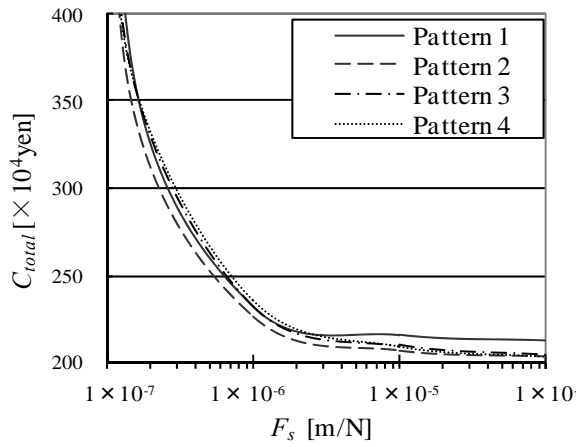
図 5-16 および図 5-17 において，静コンプライアンスの値が  $1 \times 10^{-6}$  [m/N]における各段階のコストと環境影響の値を表 5-8 に示す．表 5-8 を見ると，製造費の点ではパターン 1 が，使用費の点ではパターン 2 が優れている．パターン 1 では L サイズの本体が一つで済むため製造費が小さいが，最適な本体サイズで加工していないために使用費は大きくなっている．一方，パターン 2 は S サイズと L サイズの二種類の本体を使うため製造費が大きい，最適な本体サイズで加工できるために使用費が小さくなっている．これらの要因を足し合わせた結果，タスクパターン(i)においては本体サイズパターン 2 が最適となったのである．

**Table 5-8** Lifecycle cost and environmental impact for Task pattern (i)

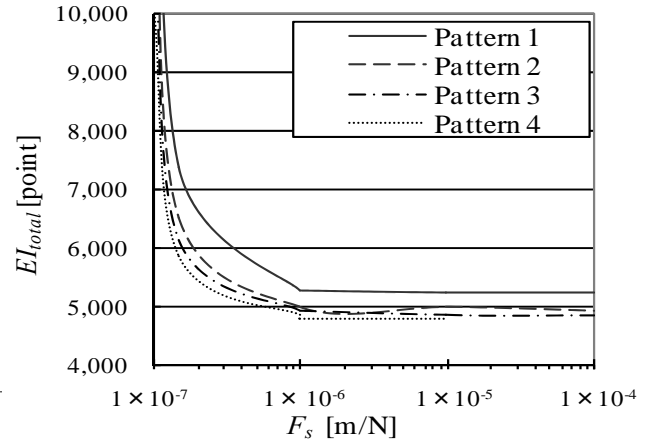
	Structural size pattern 1 (L)	Structural size pattern 2 (S, L)
$C_{\text{manufacture}} [\times 10^4 \text{yen}]$	40.2	45.2
$C_{\text{use}} [\times 10^4 \text{yen}]$	199.9	183.5
$C_{\text{disposal}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0
$C_{\text{recycle}} [\times 10^4 \text{yen}]$	0.0	0.0
$C_{\text{total}} [\times 10^4 \text{yen}]$	240.1	228.7
$EI_{\text{manufacture}} [\text{point}]$	0.0	0.0
$EI_{\text{use}} [\text{point}]$	5396.5	4955.8
$EI_{\text{disposal}} [\text{point}]$	0.0	0.0
$EI_{\text{recycle}} [\text{point}]$	94.5	99.4
$EI_{\text{total}} [\text{point}]$	5491.0	5055.2

次にタスクパターン(ii)において，表 5-7 の本体サイズパターンを用いた場合の静コンプライアンスとライフサイクルコストとのパレート最適解を図 5-18 に，静コンプライアンス

と環境影響とのパレート最適解を図 5-19 にそれぞれ示す。



**Fig. 5-18** Total lifecycle cost for Task pattern (ii)



**Fig. 5-19** Total environmental impact for Task pattern (ii)

タスクパターンが少し複雑になったため、ライフサイクルコストに関しては、静コンプライアンスの値によって最適となる本体サイズパターンは異なる。静コンプライアンスの値が  $1 \times 10^{-6}$  [m/N] における各段階のコストと環境影響の値を表 5-9 に示す。

**Table 5-9** Lifecycle cost and environmental impact for Task pattern (ii)

	Structural size pattern 1 (L)	Structural size pattern 2 (S, L)	Structural size pattern 3 (M, L)	Structural size pattern 4 (S, M, L)
$C_{manufacture} [\times 10^4 \text{ yen}]$	40.2	45.2	55.6	60.5
$C_{use} [\times 10^4 \text{ yen}]$	191.6	180.7	176.7	174.6
$C_{disposal} [\times 10^4 \text{ yen}]$	0.0	0.0	0.0	0.0
$C_{recycle} [\times 10^4 \text{ yen}]$	0.0	0.0	0.0	0.0
$C_{total} [\times 10^4 \text{ yen}]$	231.8	225.9	232.3	235.2
$EI_{manufacture} [\text{point}]$	0.0	0.0	0.0	0.0
$EI_{use} [\text{point}]$	5172.5	4878.7	4771.3	4715.5
$EI_{disposal} [\text{point}]$	0.0	0.0	0.0	0.0
$EI_{recycle} [\text{point}]$	94.5	99.4	141.7	146.7
$EI_{total} [\text{point}]$	5267.0	4978.1	4913.0	4862.1

タスクパターン(i)の場合と同じように、加工に用いる本体の数が少ないパターンは製造費が小さくなるが、最適な本体サイズで加工できないために使用費は大きくなっている。逆に加工に用いる本体の数が多いたパターンは製造費が大きくなるが、最適な本体サイズで加工できるために使用費は小さくなっている。しかし、トータルのライフサイクルコストは、どちらの段階も最適ではないパターン 2 が最適となっている。つまり、単純にライフサイクルの各段階の最適なパターンがトータルのライフサイクルコストの面で最適とは限らないのである。従って、本体サイズのどのパターンを用いるのが最適かを判断するため

には、本研究の例で示したようにトータルのライフサイクルを通して計算することが必要と言える。一方、環境影響については、使用の段階の値が非常に大きいので、使用の段階の最適なパターン4がライフサイクルとしても最適となっている。

ところで、以上の議論では工作機械を複数台使用するパターンの場合に、同時に複数台を使用することの効果については考慮していない。同時に加工すれば加工に要する期間はその分短縮できるが、本適用例では加工する部品量が一定（一台が10年間に加工する量）であるとして、加工期間を短縮してもコストに影響はないとした。しかし、加工機選定に関してより正確な評価をするためには、加工期間短縮による製造納期短縮の効果や単位時間当たりの生産能力増加の効果、反対に設置場所の確保のためのコストの増加など、同時に複数台使用することによるメリットとデメリットを詳細に査定する必要がある。

## 5.5 結言

本章では長期間使用される機械製品の代表として工作機械を選び、最適ライフサイクル設計法の提案を行った。これによって得られた点をまとめると以下のようになる。

- (1) 製造の段階のみを考慮した従来の設計解とライフサイクル要因を考慮した設計解との比較により、製品のライフサイクルを考慮することでライフサイクル全体として最適な設計解が得られることを示した。
- (2) 製品性能とライフサイクルコストのみならず、環境影響の面から製品の設計案を評価した。これにより設計者が、製品性能、ライフサイクルコスト、環境影響を同時に評価しながら意思決定を行うための指針が得られた。また、評価項目間の競合関係を詳しく分析することで、設計問題を支配している項目をより良く理解することができることを説明した。
- (3) 離散変数の変更によって得られる設計解の改良について検討し、パレート最適解を改良するための方向性を考察することができた。この方向性は各種設計パラメータを改善するための研究開発の指針となりうる。
- (4) 製品の使用条件に最適なサイズの製品に関する設計解を確認した。すなわち、複数サイズの製品を使い分けるための組み合わせを比較検討することにより、使用条件に最適な製品の組み合わせを得るための1つの方法論を提示することができた。本手法を用いて使用条件を想定したシミュレーションを行い、設計案を評価することにより、ライフサイクルを考慮した最適な製品設計案を選択することができることを示した。

## 参考文献

- (1) 吉村允孝, モノづくりにおけるシステム設計最適化, (2007), p.37, 養賢堂.
- (2) Alting, L., Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises, *Concurrent Engineering*, (1993), pp.1-17, John Wiley & Sons.
- (3) Bevilacqua, M., Development of A Sustainable Product Lifecycle in Manufacturing Firms: A Case Study, *International Journal of Production Research*, Vol.45 No.18-19(2007), pp.4073-4098.
- (4) Neto, E. R., Mariotte, M. T. and Hinz, R. T. P., Indicators to measure sustainability of an industrial manufacturing, *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development* : D. Brissaud *et al.* (eds.), (2006), pp.111-122, Springer.
- (5) Bradley, D. A. *et al.*, A design decision support model for estimating environmental impacts and costs in manufacturing, *Proceedings of the ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2006-99045(2006).
- (6) Asiedu, Y., and Gu, P., Product Life Cycle Cost Analysis: State of the Art Review, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 4(1998), pp.883-908.
- (7) Xu, X., Chen, J. L. -Q. and Xie, S. Q., Framework of a Product Lifecycle Costing System, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.6, (2006), pp.69-77.
- (8) Cheung, W.M., Newnes, L.B., Mileham, A.R., Marsh, R. and Lanham, J.D., A study of life cycle costing in the perspectives of research and commercial applications in the 21<sup>st</sup> century, *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2007-34425(2007).
- (9) Kato, S., Maruyama, N., Nikai, Y., Takai, H., and Widiyanto, A., Life Cycle Assessment Estimation for Eco-Management of Co-Generation Systems, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 123, No.1(2001), pp.15-20.
- (10) Kitagawa, M., Yamamoto, R. eds., Science on sustainability 2006, *Research on the Scientific Basis for Sustainability*, (2005), pp.215-238, E-Square Inc.
- (11) Steen, B., A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Version 2000, *Center for Environmental assessment of products and material systems*, (1999), Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning.
- (12) Goedkoop, M., and Spriensma, R., The Eco-indicator 99; A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment; *Methodology Report*, (1999), PRe Consultants.
- (13) 伊坪徳宏, 本下昌晴, ライフサイクル環境影響評価手法 LIME の概要と研究開発の現状 : ライフサイクルアセスメント (LCA) (III-3), *Journal of the Japan Institute of Energy*, Vol.84, No.10(2005), pp.872-878.
- (14) 黒岩 正, トレードオフ分析手法, 東芝レビュー, Vol.60, No.1(2005), pp.48-51
- (15) Parkinson, A., Sorensen, C. and Pourhassan, N., A General Approach for Robust Optimal Design, *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol.15, March (1993),

pp.74-80.

- (16) Gunawan,S. and Azarm,S., A Feasibility Robust Optimization Method Using Sensitivity Region Concept, *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol.127, September (2005), pp.858-865.
- (17) Kragelskii, I. V., *Friction and Wear*, (1965), Butterworths.
- (18) Yoshimura,M., Takeuchi,Y. and Hitomi,K., Design Optimization of Machine Tool Structures Considering Manufacturing Cost, Accuracy and Productivity, *Transactions of the ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 106, 4(1984-12), pp.531-537.
- (19) 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連怡, 藤本英雄, 長谷部孝男, 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発 (第 1 報,環境負荷の算出手法の提案) ,日本機械学会論文集 (C 編) Vol.71, No.704(2005), pp.1392-1399.
- (20) 成田浩久, 白瀬敬一, 若松栄史, 荒井栄司, ヴァーチャルマシニングシミュレータを用いた NC プログラムの評価と修正, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.648(2000), pp.2871-2876.



## 第 6 章 機械製品のライフサイクル設計における 3 R の視点からの最適化手法

### 6.1 緒言

二酸化炭素などの温室効果ガスの増加による地球温暖化が世界の重要な課題になっている現在、地球環境保護に配慮した経済社会の持続的な発展が強く求められている。持続的な発展を実現するためには、循環型の社会に移行していく必要がある。すなわち、資源の消費と製造や使用のためのエネルギーをできるだけ抑制するとともに、使用済みの製品はできるだけ再使用やリサイクルを行うというやり方に変える必要がある。つまり、資源をできるだけ循環して使用し、その消費を減らすというやり方である。これらの問題を扱う技術体系はライフサイクルエンジニアリング (Life Cycle Engineering : LCE) と称されており<sup>(1)(2)</sup>、第 2 章で概説した。また、素材を用いて部品を加工し、製品に組立てる操作である生産 (Manufacturing) に対して、使用済みの製品を回収し再生を行う操作は逆生産 (Inverse Manufacturing) と呼ばれており、循環型の生産を安定して実行していくためには、逆生産が技術的かつ採算的にも実現可能になるようにしなければならない<sup>(3)</sup>。

循環型生産においては、従来行われているような製品の性能や製造コストのみに着目した設計ではなく、その製品のライフサイクルを考慮した製品設計であるライフサイクル設計 (Life Cycle Design : LCD) が必要である。すなわち、製品の企画から始まり、設計、製造、輸送、使用、メンテナンス、廃棄、再生という製品のライフサイクルに亘って、各ステージでの製品の要求事項やその取り扱いについて設計の時点で検討しておくものである<sup>(4)</sup>。資源の有効利用や環境負荷の低減を目指した製品設計は、環境調和型設計や環境適合設計、エコデザインなどとも呼ばれるが、これらも LCD の範疇に含まれるものである<sup>(5)</sup>。また、従来コンカレントエンジニアリングの立場から、組立のための設計や製造のための設計がなされ、製造コストの低減や品質の改善、製品開発期間の短縮などに大きな効果を発揮しているが、近年は環境面の重視から、メンテナンス、分解、リユース、リサイクルなどの問題を設計段階で考慮する活動が増えている。これらの研究は Design for X (DFX) と称されており、現在の製造業において重要な役割を担うとともに、将来も最先端の技術になるものと期待されている<sup>(6)</sup>。

さて LCD は、逆生産を実現するように製品の一生 (ライフサイクル) を設計することであり、いわば現状個別の行動原理で行われている製品設計、製造、使用、廃棄、リサイクルなどの個々のプロセスを有機的に結合し、製品のライフサイクル全体をシステム化するような計画図を作成することである<sup>(3)</sup>。LCD で最も重要なことは、設計の上流段階で対象とする製品のライフサイクル特性に最適なビジネス戦略とライフサイクル戦略を決定することであり、そのためには製品のライフサイクル特性を十分に把握した上でライフサイクル・オプションの最適な組合せを選定することが肝要であるとされている。LCE や LCD に関する研究はこれまでに多数行われてきており、LCP (Life Cycle Planning) や環境指向

型 QFD (Quality Function Deployment) のような LCD を支援する有用な手法や考え方、また再利用による経済性と環境負荷の面から終末処理 (End of Life) の取扱いを最適化するための分解型製品の設計法などが報告されている<sup>(7-11)</sup>。一方、製品設計においてコストの評価は製品性能と同様必要不可欠の項目であるため、特に LCD においては、これまで全ライフコスト (Through-Life-Costing) やライフサイクルコスト (LCC) としてモデル化の研究が数多く行われている<sup>(12)(13)</sup>。さらに、ライフサイクルシミュレーションに関しては、設備や製品のリユース、リサイクルに焦点を当てた研究なども種々実施されている<sup>(14-16)</sup>。

ところで LCE の問題においては、一般的に環境面の改善と経営性はトレードオフの関係にあることが多い。すなわち、資源・エネルギーや環境負荷の低減と製品性能の向上や製造コストの低減などを同時に実現することは難しい。従ってこの場合には、両者のバランスをいかに取るかが問題であり、環境面と経営面の要求に対する意思決定を同時的に支援することのできる設計支援システムの構築が望まれるのである。言い換えれば、製品のライフサイクルに関わる評価項目と製品性能をコンカレントに考慮した最適設計のための支援システムが求められている。しかしながらこれまでの研究においては、製品性能とライフサイクルに関わる評価特性のコンカレント最適化という観点から定量的な解析を行ったものは少ない。この問題に対して吉村は、以前にライフサイクルを考慮した設計の最適化について一つの手順を示している<sup>(17)</sup>。そこでは、先ず製品のライフサイクル段階とその問題において評価すべき特性を明確にし、次にそれぞれの評価特性間の関係を明らかにする。そして問題を定式化した後、これらをコンカレントに最適化することにより設計解を得るというものである。さらに吉村らは、多くの設計変数が存在する複雑な問題の最適化に当たっては、先ずその問題を単純化して段階的に取り扱うという多層最適化設計手法の有効性を提唱している<sup>(18)</sup>。

以上のような研究の背景を踏まえて、本章においては、製品の製造から使用、メンテナンス、廃棄、再使用、リサイクルまでのライフサイクル段階を含む問題に対して、その基本設計において、製品性能とライフサイクルコストの面から最適化を行う手法を提案することを目的とした。そして最適化に当たっては、環境問題を論じる場合によく用いられる 3R (Reduce, Reuse, Recycle) の考え方を利用してこの観点から最適化の優先性を検討し、主要な製品性能と 3R の考え方にもとづいたライフサイクルコストを評価項目に選んで多目的最適化手法による最適化解析を行い、機械設計の最適解を得る手順を採用した。さらに本手法の妥当性を検証すべく、適用例として一軸方向に移動する簡単なロボットモデルを対象に最適設計を行った。

以下、6.2 節で製品のライフサイクルを考慮した設計の最適化に対する考え方を述べ、6.3 節で適用例を説明する。そして 6.4 節でそれらの結果について考察を行い、6.5 節で結言を述べる。

## 6.2 製品のライフサイクルを考慮した最適設計手法

### 6.2.1 ライフサイクル設計について

ライフサイクル設計（LCD）を考える時には、製品の寿命をどのように考えるかが大事である。製品の寿命は消費財と生産財では、様相が異なる。消費財と呼ばれるものは、比較的安価な製品が多く、耐用寿命が来た時あるいは陳腐化（機能寿命）した場合は、**up grade** するコストと新品購入価格がそれ程変わらないので、廃棄して更新されることが多い。一方、生産財と呼ばれるものは、比較的長い期間使用するように設計されており、価格も比較的高価なため、故障時のメンテナンスは当然のこと、技術革新により機能寿命となっても、**up grade** して継続使用されることが多い。LCD としては、製品がその寿命により廃却される場合は、出来るだけ部品の再使用または材料の再生（リサイクルによる再資源化）が行われるようにすることが必要である。

理想的なライフサイクル設計としては、

- 1) 使用する資源の最小化（例えば、軽量化設計）
- 2) 使用時のエネルギーの最小化（例えば、家電の省エネ設計や自動車の低燃費設計）
- 3) 使用時の故障発生の最小化（高信頼性設計、耐用寿命延長）
- 4) 廃棄物のゼロ化（全てリサイクル、再資源化）
- 5) 廃棄物処理コストの最小化（易分解性、易解体性、リサイクル容易性）

などを目指すことが必要である。

本章では、これらのことを念頭に置き LCD のモデルを考えていくことにする。LCD の対象とすべき製品は、何らかの作業に供される機械装置とし、その製品には固有な性能が要求される。そして製品は、部品としての構造部材の組立により成り立っているものとする。また製品の設計においては、その構造は重要な要素であるが、以下で述べる議論では、製品の構造は与えられたものとし、決定すべき設計変数としては、使用する材料（材質）の特性と部材の寸法を考えることとする。

### 6.2.2 ライフサイクルの各段階と評価項目

ライフサイクル設計においては、図 6-1 に示すような全てのライフサイクルの段階における項目と要因を設計の段階でコンカレントに考慮することが必要である<sup>(19)</sup>。この図において、円の内部の矢印はライフサイクル段階の進行を表す。また、製造や分解の段階においてこの円のサイクルに出入している矢印は、材料の移動を示している。本章においては、この中で、製造、使用、メンテナンス、再使用および廃棄後の再利用（マテリアルリサイクル）の段階を考慮することとする。

次にこれらの段階において評価すべき項目としては、表 6-1 の例に示すような種々のものが考えられる。この表からも分かるように、製品の設計において「コスト」は評価項目の中で最も重要なものの一つである。そこで本研究においては、製品性能とライフサイクルの各段階におけるコストを評価項目に選ぶこととする。すなわち、製造にかかるコスト、使用時のコスト、メンテナンスにかかるコスト、再使用のためのコスト、再利用のための再生（マテリアルリサイクル）にかかるコストである。再使用の段階の評価項目としては

分解コストをカウントするが、再使用に供する部品のコストを下げるための方策としては、各部品の耐用寿命を延長する（その結果として製品の耐用寿命が延長される）ことが有効であるため、再使用に関する最適化としては製品の耐用寿命を評価項目として採用する。

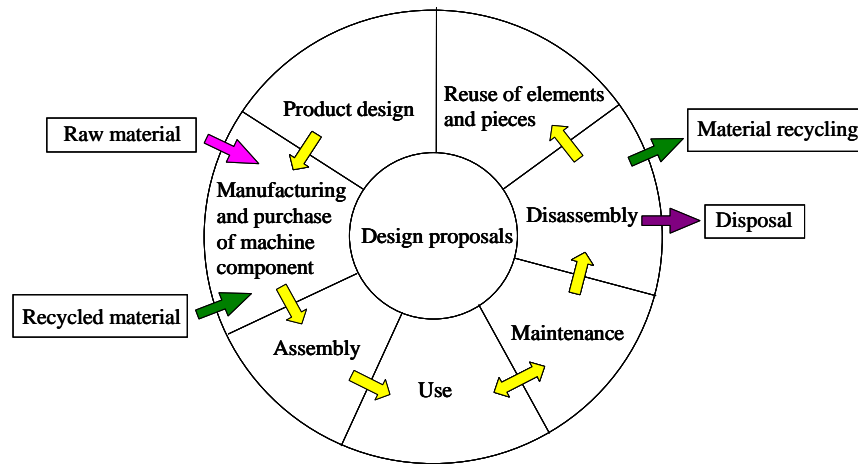


Fig. 6-1 Concept of life cycle design

Table 6-1 Product's life cycle stage and evaluative items

Life cycle stage	Evaluative items	Optimization	Variables
manufacturing	cost, energy proportion of parts reuse	minimization maximization	process parts longevity
use	cost (material, energy, etc)	minimization	condition
maintenance	cost (inspection, cleaning, repair) system reliability	minimization maximization	assembling structure parts longevity
abandonment collection	delivery (transportation) cost	minimization	volume, weight
disassembly dismantlement	cost easiness of assembly easiness of dismantlement	minimization maximization	parts number, structure (modular, connection type)
reuse recycling	proportion of parts reuse easiness of recycling, proportion of material recycling cost, waste quantity	maximization maximization maximization minimization	parts number, parts longevity, material, number of materials, assembling structure

### 6.2.3 最適化の手順

環境保護の問題を議論する場合、3Rという考え方がある。3Rは、Reduce, Reuse, Recycle のことであるが、その中ではまずは Reduce を優先させるべきであり、優先度は 1) Reduce, 2) Reuse, 3) Recycle の順序と言われている。そこで本章においても、この考え方に則り最適化を考えていくことにする。すなわち、基本的には 1) Reduce の最適化, 2) Reuse の最適化, 3) Recycle の最適化の順序で考える。

今機能寿命について考えてみる。

- ・製品または部品に機能寿命がある場合は、機能寿命に達した時に「廃棄」が行われる。廃棄された製品または部品が **recycle** 可能であれば **recycle** されるが、**recycle** 不可の場合は、埋め立てせざるを得ない。一方、環境負荷を抑制するためには、出来るだけ埋め立ては避けねばならないので、このような **recycle** が難しいまたは不可の製品または部品は、**reuse** が出来ること、あるいは出来るだけ **reuse** を行うようにせねばならない。そしてこの場合は出来るだけ長く使用できることが望ましく、長寿命化が目標となる。
- ・製品または部品に機能寿命が無い場合は、壊れない限り使用できる、つまり物理寿命に支配されるため、より製品を長期間使用するためには、長寿命化が必要となる。

さて 3 R を考慮した設計においては、先ず **reduce** を考えるべきだと述べたが、**reduce** を進めることは、**reuse** や長寿命化の観点からは、望ましくない方向になることもある。例えば、部品寸法を減らすことによって、強度面で厳しくなり、耐用寿命が低下する可能性がある（その場合、部品の **reuse** の能力が低下することになる）。つまり、**Reduce** と **Reuse** または長寿命化は、トレードオフになることがある。それ故に本章では、最適化の方向として大きく以下の 2 つのパターンを考えることにした。

① **Reduce** の最適化（消耗部品など）

② **Reuse** のための長寿命化を目指した最適化（耐久部品や **recycle** が不可又は難しいもの）

ところで製品設計においては、材料選択は重要な意思決定であるが、材料は離散的な設計変数であるため、一般的には設計の初期段階で決定することが望ましいものである。また、**Recycle** の最適化を考える場合には **recycle** コストが問題になるが、これは使用する材料に依存するため、「材料」が決定すべき変数になる。**Recycle** の最適化を解析の最後に行うことにして、その段階で離散的な設計変数が用いられれば、それまでに行った最適化の結果が大きく変化する可能性があり望ましくない。以上の観点から、設計変数としての材料については、最適化の最初の段階で絞り込んでおく方が良いと考えられる。そこで本章でのライフサイクル設計の最適化手順としては、**Reduce** および **Reuse** を目指した最適化の各パターンについて、先ず使用材料を絞り込むプロセスを行い、その後製品性能と各パターンに特有なライフサイクルコストを目的関数にした二目的最適化を行うこととする。それらの手順について以下の節で説明する。

#### (1) 使用材料の選定

使用材料を選ぶための最適化の手順を説明する。この解析における設計変数は、使用材料の特性を表す項目である、a.材料密度、b.材料単価、c.材料強度、d.再生処理単価とする。この解析では、設計変数である部品寸法は、寸法制約範囲の代表的な寸法（例えば、**medium** 値やパレート最適解の設計変数値など）に設定して、製品性能およびライフサイクルコストの最小化を目的関数として設計変数を変化させ、最良と思われる候補材料を 2～3 種類に絞る。ここで 2 つのパターンのライフサイクルコストとしては、次に定義する **Reduce**

および Reuse のための 2 種類  $C_{LC1}$ ,  $C_{LC2}$  を採用した．これらのコストの構成は，ライフサイクル各段階のコストのトレードオフ関係を考慮して設定している．

$$C_{LC1} = \text{製造コスト} + \text{使用コスト} + \text{リサイクルコスト}$$

$$C_{LC2} = \text{製造コスト} + \text{メンテナンスコスト} + \text{分解コスト}$$

## (2) Reduce の最適化

Reduce を重視した最適化の方法について説明する．この戦略は，製品をその寿命まで使用して廃棄する迄に，使用する資源やエネルギーをできるだけ減らそうとするもので，製造，使用および廃棄後の再生段階のコストを最小化することを目的とするものである．前項(1)で Reduce 用として選定された材料に対して，以下の最適化を行う．すなわち，製品性能と Reduce に関わるライフサイクルコストを目的関数として二目的の最適化を行い，パレート最適解を求める．製品性能（ここでは望小特性とする）を  $f$ ，ライフサイクルコストを  $C_{LC1}$ ，部品の数を  $n$ ，設計変数としての部品寸法を  $d_i$  とすると，最適化問題の定式化は以下になる．

$$\min \{f, C_{LC1}\} \quad (6.1)$$

$$\text{subject to} \quad g_i = d_{i\min} - d_i \leq 0 \quad (6.2)$$

$$g_{i+n} = d_i - d_{i\max} \leq 0 \quad (6.3)$$

$$\text{ここで, } i=1,2,\dots,n$$

## (3) Reuse の最適化

Reuse を重視した最適化の方法について説明する．この戦略は，部品の耐用寿命を長くすることにより，メンテナンスを少なくして製品をその機能寿命まで出来るだけ長く使用することと，製品の寿命後も出来るだけその部品を再使用することを目指すものであり，製造，メンテナンスおよび再使用段階のコストを最小化することを目的とするものである．前項(1)で Reuse 用として選定された材料に対して，以下の最適化を行う．すなわち，製品性能と Reuse に関わるライフサイクルコストを目的関数として二目的の最適化を行い，パレート最適解を求める．ここで分解コストは，分解の対象となる部品数と分解単価によって表され，その数式表現は，次項(4)で示す．Reuse に関係するコスト  $C_{LC2}$  を用いて，最適化問題の定式化は Reduce の場合と同様に次のようになる．

$$\min \{f, C_{LC2}\} \quad (6.4)$$

$$\text{subject to} \quad g_i = d_{i\min} - d_i \leq 0$$

$$g_{i+n} = d_i - d_{i\max} \leq 0$$

ここで,  $i=1,2,\dots,n$

#### (4) ライフサイクルコストの定式化

次にライフサイクルコストの定式化について述べるが, ここで対象とするコストは, 6.2.2 節の表 6-1 に示したライフサイクル段階の評価項目の内の一部を抜き出したものである. 以下では, ライフサイクル各段階のコストとしての, 製造コスト, メンテナンスコスト, 分解コスト, リサイクルコストについての基本的な定式化について記述する. 次節 6.3 の適用例で用いる数式は, これらの基本式に必要な数値を代入することによって得るものとする.

##### 1) 製造コスト

製造コスト  $C_{Mf}$  は, 材料コスト  $C_{M1}$  と加工コスト  $C_{M2}$  から成り立つとする. すなわち,

$$C_{Mf} = C_{M1} + C_{M2} \quad (6.5)$$

簡単のために, 各部品は中実の正方形断面の梁とし, その断面積, 1 辺の長さ, 部品の長さを  $S_i, d_i, l_i$  で, 部品の材料密度, 材料単価を  $\rho_j, \alpha_j$ , および製品の質量を  $W$  で表すと, 材料コストは次のように表される.

$$C_{M1} = W \times \alpha_j = \sum_{i=1}^n \rho_j S_i l_i \times \alpha_j = \rho_j \alpha_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2 \quad (6.6)$$

次に加工コストについては, 部品の両端面の加工を考慮することにし, 単位面積当たりの加工単価を  $U_u$  とすると, 次のように表される.

$$C_{M2} = U_u \times \sum_{i=1}^n 2d_i^2 \quad (6.7)$$

##### 2) メンテナンスコスト

メンテナンスコストについては, 次のように考える. 今製品の機能寿命を  $L_F$ , 耐用寿命を  $L_P$ , また部品の耐用寿命を  $L_i$  で表すことにする. そして, 製品の機能寿命が耐用寿命よりも長い場合を考える. すなわち,  $L_P \leq L_F$ .

部品寿命については, 次のような仮定をおく. すなわち, 部品はその材料の強度が高いほど, またその断面積が大きいほどより大きな負荷に耐えられるため, 寿命も長くなると考え, 部品の断面積  $S_i$ , 材料強度  $\sigma_B$  および係数  $k$  を用いて下式のように表されたとする.

$$L_i = k S_i \sigma_B \quad (6.8)$$

製品の耐用寿命に関しては, 製品が部品の直列配置で構成されていると仮定すると, 下記のように表される<sup>(20)</sup>.

$$L_P = 1 / \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \right) = 1 / \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{k S_i \sigma_B} \right) \quad (6.9)$$

修理 1 回当たりの費用（修理費単価）を  $r$  とすると、製品の使用期間  $T$  における修理コスト  $C_{Mt}$  は、以下の式で表される。但し、 $T \leq L_F$  とする。

$$C_{Mt} = r \times T / L_p = rT \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} = \frac{rT}{k\sigma_B} \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (6.10)$$

式(6.10)においては、修理費単価  $r$  は一定値と考えた。すなわち、一般的には製品の故障は色々な部位や形態で発生するため、その修理コストは変化する。言い換えれば、メンテナンスの難易度が存在するものであるが、今回のコスト評価モデルでは、それを表すような設計変数は考慮しなかった。

### 3) 分解コスト

再使用のための分解コスト  $C_{DA}$  は、分解の対象となる全部品の数  $N_{da}$  と部品 1 個当たりの分解に要する費用（分解単価） $a$  によって表される。一般的には、部品の種類や部位により分解単価は異なるものであるが、今回のモデルでは、簡単のために全ての部品について分解単価は一定とした。その結果、分解コストは次式のように表した。

$$C_{DA} = N_{da} \times a \quad (6.11)$$

### 4) リサイクルコスト

リサイクルコスト  $C_{RC}$  は、製品の廃棄時全ての部品が再利用（マテリアルリサイクル）されるとして、製品重量に再生処理単価  $\beta_j$  をかけて下式で算出する。

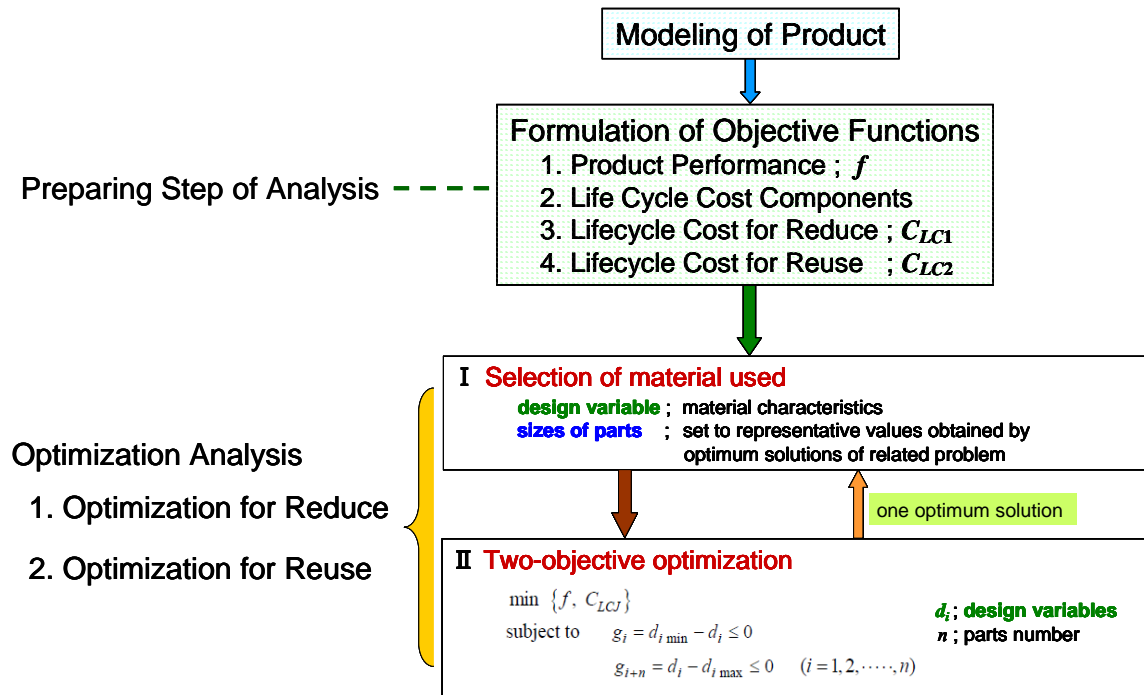
$$C_{RC} = W \times \beta_j = \sum_{i=1}^n \rho_j S_i l_i \times \beta_j = \rho_j \beta_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2 \quad (6.12)$$

以上より、使用コスト  $C_U$  を含めて、全ライフサイクルコスト  $C_{TLC}$  を次のように定義する。

$$C_{TLC} = C_{Mf} + C_U + C_{Mt} + C_{DA} + C_{RC} \quad (6.13)$$

以上、最適化の手順について述べてきたが、本章で用いた最適化問題の枠組みと解析の手順について、再度その概容とフローを示すと、図 6-2 のようになる。





**Fig. 6-2** The procedure for Reduce or Reuse optimization analysis

## 6.3 機械製品への適用

### 6.3.1 産業用ロボットのモデル

本章の適用例として解析の対象に選んだものは、図 6-3 に示したような直交座標の一軸方向を移動するロボットのモデルである。このロボットは、3つの部材と直線上を移動する送り装置で構成されており、各部材は正方形断面を持った梁で、それぞれの長さは 0.7, 0.5, 0.2 [m]とし、断面の1辺の長さは、最小値が 0.05 [m]、最大値が 0.20 [m]の間の値をとるものとする。送り装置は部材 1 に付随したものであるが、解析においてはその形状や重量は考慮しないこととする。そしてこのロボットは、Y 軸方向のある距離を一定速度で往復移動し、部材 3 の先端に移動方向の外力を受けるものとする。

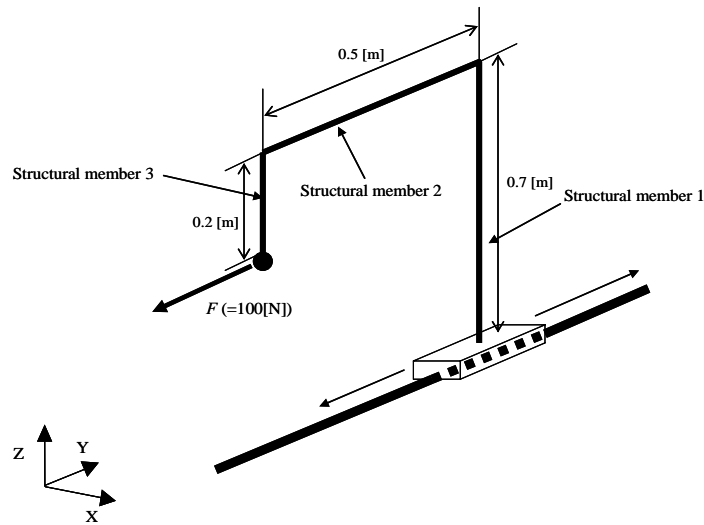


Fig. 6-3 Model of an axial robot

### 6.3.2 目的関数の定式化

#### (1) 製品の性能

ロボットの評価性能としては、位置決め時の動作精度や作業能率などが挙げられるが、ここでは動作精度を考える。すなわち、荷重を受けて一軸方向に距離  $L$  を往復移動しているロボットが停止したときの軸方向の停止精度を対象とする。この問題を考えるために、ロボットのモデルを図 6-4 に示すような質量  $m$  とばね剛性  $k$  を持った自由度 1 の振動モデルに置き換えることにする<sup>(21)</sup>。

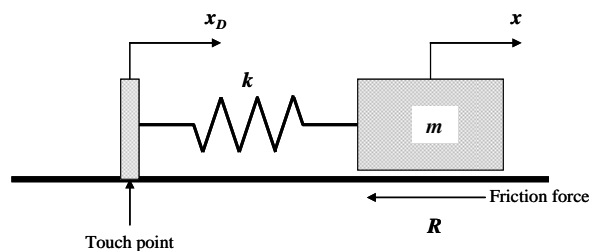


Fig. 6-4 Vibration model of traveling robot

図 6-4 においてロボット全体の弾性係数を  $k$  とし、外力のかかる部分の変位を  $x$ 、駆動力のかかる部分の変位を  $x_D$  とする。摩擦力  $R$  が働いている時のこのモデルの運動方程式は、 $\dot{x} > 0$  の場合次式となる<sup>(22)(23)</sup>。

$$m\ddot{x} = -k(x - x_D) - R \quad (6.14)$$

今摩擦力  $R$  としてはしゅう動体の運動摩擦のみを考えると、 $\mu_d$  を運動摩擦係数として、

$$R = \mu_d mg \quad (6.15)$$

となる。これよりしゅう動部分の基礎方程式は、次式で表される。

$$\ddot{x} + \omega^2(x - x_D) = -\mu_d g \quad (6.16)$$

ここで  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  は、系の固有振動数を表している。

停止精度としてのオーバーラン距離  $x_{OR}$  を求めるために、次のような仮定を置く。すなわち、 $t=0$  で停止命令が与えられ、定常送り速度  $V$  で移動していた送り装置は瞬間的に停止する（制動時間はゼロとする）。

$$\begin{aligned} \dot{x}_D &= V & (t \leq 0) \\ \dot{x}_D &= 0 & (t > 0) \end{aligned} \quad (6.17)$$

また、 $t=0$  で  $x_D=0$  とおき、初期条件を以下のように取ることにする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \\ x &= x_0 = -\mu_d g / \omega^2 \end{aligned} \quad \text{at } t=0 \quad (6.18)$$

ここで、 $x_0$  はしゅう動体が停止すべき目標位置である。

これらより結局、しゅう動体のオーバーラン距離は、しゅう動体の送り速度と固有振動数によって下式のように表される<sup>(22)</sup>。

$$x_{OR} = \frac{V}{\omega} = V \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{V}{2\pi f} \quad (6.19)$$

次に、図 6-3 のモデルにおいて、部材 3 の先端に外力をかけた時の静コンプライアンスは、機械システムの静剛性の逆数として解析的に求められる。すなわち、部材  $i$  の縦弾性係数を  $E$ 、断面 2 次モーメントを  $I_i$  とすると、静コンプライアンス  $f_s$  は、全体の変位  $\delta$  ÷ 負荷  $F$  により求めることができ、下式で表される。

$$\begin{aligned} f_s = \frac{\delta}{F} &= \frac{1}{3} \frac{l_1^3 - 3l_1^2 l_3 + 3l_1 l_3^2 - l_3^3}{EI_1} + \frac{l_2 l_3^2}{EI_2} + \frac{1}{3} \frac{l_3^3}{EI_3} \\ &= \frac{1}{3} \frac{(l_1 - l_3)^3}{EI_1} + \frac{l_2 l_3^2}{EI_2} + \frac{1}{3} \frac{l_3^3}{EI_3} \end{aligned} \quad (6.20)$$

また、断面 2 次モーメントは、下式の通りである。

$$I_i = \int_{-d_i/2}^{d_i/2} d_i y^2 dy = \frac{d_i^4}{12} \quad (6.21)$$

今回のモデルでは、静剛性としては部材の曲げ剛性  $k_M$  のみを考え、部材の接合部剛性は考慮しないこととする。以上より、部材 3 の先端にかかる荷重を 100 N とした時の動作精度  $A_T$  の最大値は、オーバーラン距離と変位の和として、次式で表される。

$$A_T = x_{OR} + 100 \times f_S = \frac{V}{2\pi f} + \frac{100}{k_M} = V \sqrt{\frac{W}{k_M}} + \frac{100}{k_M} \quad (6.22)$$

## (2) ライフサイクルコスト

6.2.3 節の(4)項で述べた内容に従って、ライフサイクルの各段階におけるコストの定式化を行う。

### 1) 製造コスト

部材の長さを  $l_1 = 0.7\text{m}$ ,  $l_2 = 0.5\text{m}$ ,  $l_3 = 0.2\text{m}$  とすると、式(6.6)より材料コストは、

$$C_{M1} = \sum_{i=1}^3 \rho_j S_i l_i \times \alpha_j = 0.1 \rho_j \alpha_j \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \quad (6.23)$$

加工コストは、加工単価  $U_u$  [yen/m<sup>2</sup>] が加工面の表面粗さ  $R_{\max}$  (最大粗さ) を用いて以下のように表わされると仮定する<sup>(24)</sup>。

$$U_u = 8580 \times R_{\max}^{-0.2288} \quad (6.24)$$

表面粗さ  $R_{\text{rms}}$  を  $1\mu\text{m}$  と仮定すると、 $R_{\max} = 6 [\mu\text{m}] = 6 \times 10^{-6} [\text{m}]$ 。従って加工単価は、

$$U_u = 8580 \times R_{\max}^{-0.2288} = 8580 \times (6 \times 10^{-6})^{-0.2288} = 1.34 \times 10^5 [\text{yen/m}^2]$$

これを式(6.7)に代入することにより、製品の加工コストは下式となる。

$$C_{M2} = U_u \times (2d_1^2 + 2d_2^2 + 2d_3^2) = 2.68 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5 \quad (6.25)$$

以上より、製品の製造コスト  $C_{Mf}$  は、次のように表される。

$$C_{Mf} = C_{M1} + C_{M2} = 0.1 \rho_j \alpha_j \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) + 2.68 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5 \quad (6.26)$$

### 2) 使用コスト

使用期間を  $T$  年としてこのロボットが移動距離  $L$  を往復する回数は、稼働率を暦年で 70% とすると、

$$365 \times T \times 0.7 \times 24 \times 3600 / (2L/V) = 11 \times VT / L \times 10^6$$

従って、使用期間  $T$  年での消費エネルギー  $E_{\text{use}}$  [N・m] は、加速時と等速運動時のエネルギーを考慮して、

$$E_{\text{use}} = 11VW \left( \frac{V^2}{L} + 2\mu_d g \right) \times T \times 10^6 \quad (6.27)$$

今  $L=2[\text{m}]$  と仮定し、さらにエネルギー単価:  $\alpha$  を、 $\alpha = 15[\text{yen/kWh}] = 4.17 \times 10^{-6}[\text{yen/Joule}]$  とおくと、使用コスト  $C_U$  は、

$$C_U = E_{use} \times \alpha = 11VW \left( \frac{V^2}{2} + 2\mu_d g \right) \times T \alpha \times 10^6 = 45.8VW \left( \frac{V^2}{2} + 2\mu_d g \right) \times T \quad (6.28)$$

となる。  $W$  を  $d_i$  で表すと、

$$C_U = 4.58V \left( \frac{V^2}{2} + 2\mu_d g \right) \times T \rho_j \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \quad (6.29)$$

以下の解析では  $V=1.0[\text{m/s}]$ ,  $\mu_d=0.15$  とした。この時使用コスト  $C_U$  は、次式となる。

$$C_U = 15.8 T \rho_j \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \quad (6.30)$$

### 3) メンテナンスコスト

コスト計算のためには、6.2.3 節(4)項の式(6.8)における係数  $k$  の値を決める必要があるが、 $k$  の値は、 $S_i$  や  $\sigma_B$  の値が変化した時に、製品耐用寿命  $L_P$  が  $T$  以下になるように設定する。今  $L_F$  を 2 年と考え、 $T=2$  年に設定する。さらに設計変数としての部材の断面積や使用する材料強度の値などを考慮し、 $k$  の値を下記のように設定した。

$$k = 3.0 \times 10^{-7} [\text{年/N}] \quad (6.31)$$

また、例えば材料が普通鋼の場合は、 $\sigma_B = 400 [\text{MPa}] = 400 \times 10^6 [\text{N/m}^2]$  であり、設計パラメーターを、 $r = 5,000 [\text{yen}]$ ,  $T = 2$  年とし、上式の  $k$  の値を用いると、6.2.3 節(4)項の式(6.10)からメンテナンスコストは、次式のようになる (単位: yen)。

$$C_{Mt} = 83.3 \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right) \quad (6.32)$$

### 4) 分解コスト

分解コストは、この場合部品数は 3 であるから、6.2.3 節(4)項の式(6.11)より分解単価のみに依存して次式となる。

$$C_{DA} = 3a \quad (6.33)$$

簡単のため、分解単価  $a$  が設計変数  $d_i$  に係わらず一定とすると、分解コストは一定値となり、最適化解析には無関係となる。

### 5) リサイクルコスト

リサイクルコストは、6.2.3 節(4)項の式(6.12)より次式のようになる。

$$C_{RC} = W \times \beta_j = 0.1 \rho_j \beta_j \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \quad (6.34)$$

### 6.3.3 最適化解析

表 6-2 に解析に用いた 9 種類の鉄鋼系とアルミ合金系の候補材料を示す．これらの材料について，6.2.3 節(1)項で述べた手順により，Reduce および Reuse 最適化に対する最適な材料を求めた．次に，それぞれの最適化で選定された鉄鋼系およびアルミ合金系の 2 つの材料について，6.2.3 節(2)項および(3)項で述べた手順に基づき，Reduce および Reuse の 2 種類の二目的最適化を行い，ロボットの動作精度とライフサイクルコストに関するパレート最適解を得た．

なお最適化計算手法については，多目的最適化の手法は従来いくつかの方法が提案されているが<sup>(25)</sup>，本章では一般的によく知られている重み係数法<sup>(26)</sup>および効率の高いアルゴリズムである NBI 法<sup>(27)</sup>を使用した．すなわち，前者は次節 6.3.4 解析結果の(2)項で述べる各ライフサイクルコストの相互関係および(3)項の静コンプライアンスとライフサイクルコストの解析に，後者は(3)項の Reduce および Reuse 最適化における動作精度とライフサイクルコストの解析に用いた．後者は市販のソフト (Optimus) が有する機能である．

**Table 6-2** Candidate materials used for optimization analysis

Material	Elastic modulus ( $\times 10^5 \text{MPa}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Tensile strength (MPa)	Unit price (yen/kg)	Unit recycling cost (yen/kg)
Cast iron 1	1.20	7200	250	30	15
Cast iron 2	1.20	7200	300	35	15
Mild steel 1	2.10	7870	350	40	20
Mild steel 2	2.10	7870	400	50	20
High strength steel 1	2.10	7870	480	70	30
High strength steel 2	2.10	7870	550	85	30
Aluminum alloy 1	0.70	2700	300	220	125
Aluminum alloy 2	0.70	2700	380	250	125
Aluminum alloy 3	0.70	2700	450	280	125

### 6.3.4 解析結果

#### (1) 最適材料の選定

表 6-2 の候補材料に対して，まず Reduce 最適化の場合の最適材料を選定した結果を，表 6-3 に示す．表 6-3 におけるライフサイクルコスト  $C_{LCI}$  は，次項(3)で述べる二目的のパレート最適解の一つを参考にして，設計変数を  $d_1=0.15$ ,  $d_2=0.08$ ,  $d_3=0.05[\text{m}]$  に設定して計算したものである．表中で製品性能に関する評価項目 ( $\rho/E$ ) とライフサイクルコストに関する優位性の順序を，“preferable order”の欄に示している．表 6-3 で鋳鉄は，鉄鋼グループの中ではライフサイクルコストは最も小さいが，製品性能が低いため総合的には普通鋼より劣ることになる．この結果，Reduce 最適化の場合は，鉄鋼グループでは普通鋼 1 が，アルミ合金グループではアルミ合金 1 が最も優れていると判断した．

**Table 6-3** Result of optimal material selection for Reduce optimization

Material	Material characteristics		Lifecycle cost (kilo-yen)	
	$\rho/E$	preferable order	$C_{LC1}$	preferable order
Cast iron 1	0.06000	3	59.0	4
Cast iron 2	0.06000	3	59.7	5
Mild steel 1	0.03748	1	66.0	6
Mild steel 2	0.03748	1	67.5	7
High strength steel 1	0.03748	1	72.1	8
High strength steel 2	0.03748	1	74.4	9
Aluminum alloy 1	0.03857	2	43.1	1
Aluminum alloy 2	0.03857	2	44.7	2
Aluminum alloy 3	0.03857	2	46.3	3

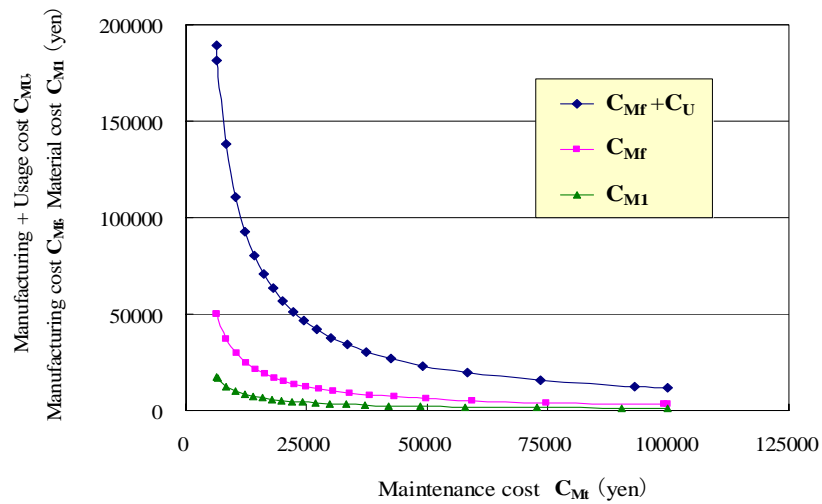
同様に、Reuse 最適化の場合の最適材料の選定結果を、表 6-4 に示す。表 6-4 におけるライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  は、次項(3)で述べる二目的のパレート最適解の 1 つを参考にして、設計変数を  $d_1=0.15$ ,  $d_2=0.12$ ,  $d_3=0.10$ [m] に設定して計算したものである。この表より、Reuse 最適化の場合は、鉄鋼グループでは普通鋼 2 が、アルミ合金グループではアルミ合金 3 が最も優れていると判断した。

**Table 6-4** Result of optimal material selection for Reuse optimization

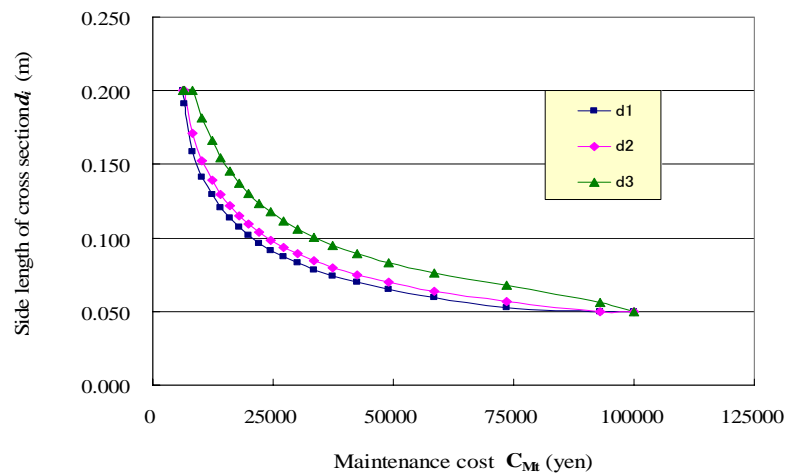
Material	Material characteristics		Lifecycle cost (kilo-yen)	
	$\rho/E$	preferable order	$C_{LC2}$	preferable order
Cast iron 1	0.06000	3	46.5	6
Cast iron 2	0.06000	3	42.6	5
Mild steel 1	0.03748	1	40.8	2
Mild steel 2	0.03748	1	40.2	1
High strength steel 1	0.03748	1	41.2	3
High strength steel 2	0.03748	1	42.2	4
Aluminum alloy 1	0.03857	2	51.2	9
Aluminum alloy 2	0.03857	2	48.2	8
Aluminum alloy 3	0.03857	2	47.3	7

## (2) 各ライフサイクルコストの相互関係

6.3.2 節(2)項のライフサイクルコストの定式より判断できるように、トレードオフの関係にある製造コストおよび使用コストと、メンテナンスコストの関係を解析した。使用材料を鋼とした場合のパレート最適解とその時の設計変数を、図 6-5 と図 6-6 に示す。



**Fig. 6-5** Pareto optimum solution for  $C_{Mf}$ ,  $C_u$ ,  $C_{M1}$  and  $C_{Mt}$



**Fig. 6-6** Optimum solutions of design variables vs. maintenance cost

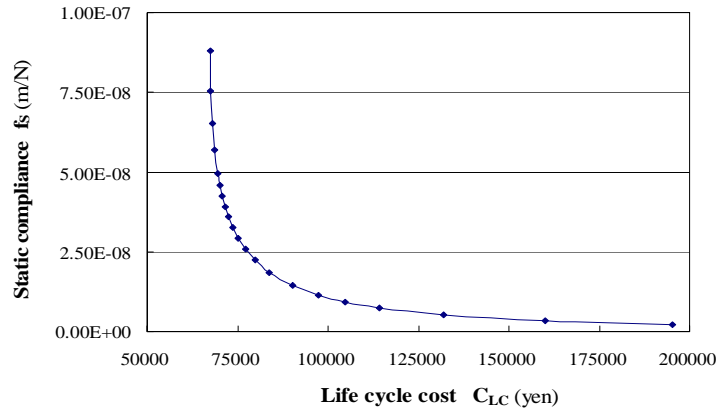
図 6-5 は、普通鋼の場合に、材料コスト、製造コストおよび使用コストと、メンテナンスコストとのパレート最適解の様子を示す。図 6-6 は、図 6-5 における[製造コスト+使用コスト]のパレート最適解における設計変数の最適解を、横軸にメンテナンスコストをとって示したものである。設計変数の上限値と下限値で各目的関数が最大値または最小値をとる代表的なパレート解となっており、メンテナンスコストは明確に他のコストとトレードオフの関係にある。またこの例は、使用期間  $T$  が 2 年の場合であるが、図 6-5 より部材寸法が大きくなると、使用コストが急激に増加することが分かる。



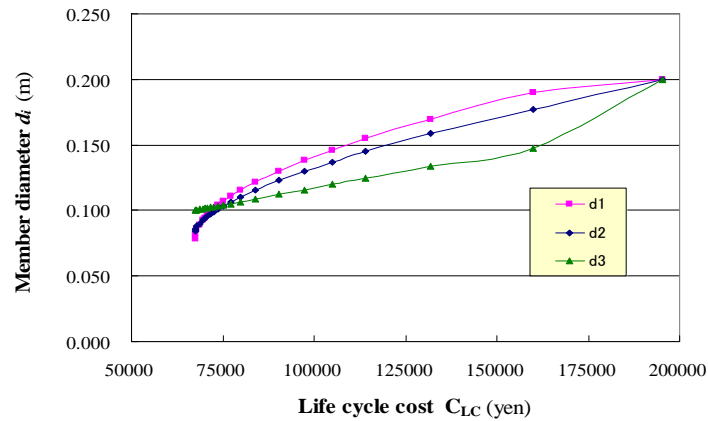
### (3) 製品性能とライフサイクルコストの関係

#### 1) Reduce の最適化

動作精度の一部である静コンプライアンスとライフサイクルコスト（ここでは、 $C_{Mf}$ と $C_u$ および $C_{Mt}$ の和とした）の関係を普通鋼の場合について調べた、その結果を図 6-7 に示す。きれいなパレート解となっている。またこの場合の設計変数の最適解を図 6-8 に示す。

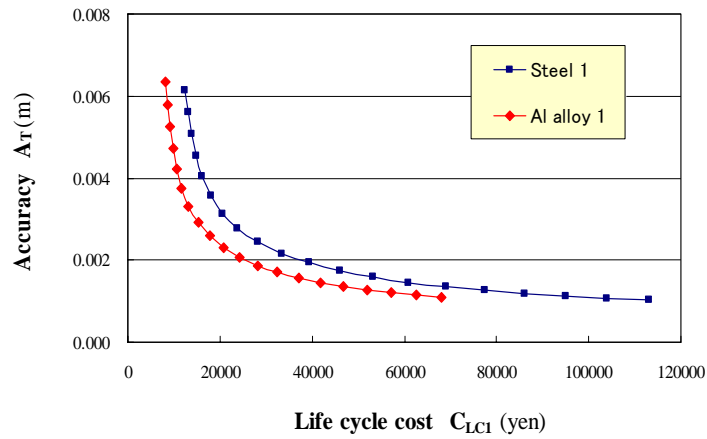


**Fig. 6-7** Pareto optimum solution for static compliance and lifecycle cost (sum of  $C_{Mf}$ ,  $C_u$  and  $C_{Mt}$ )

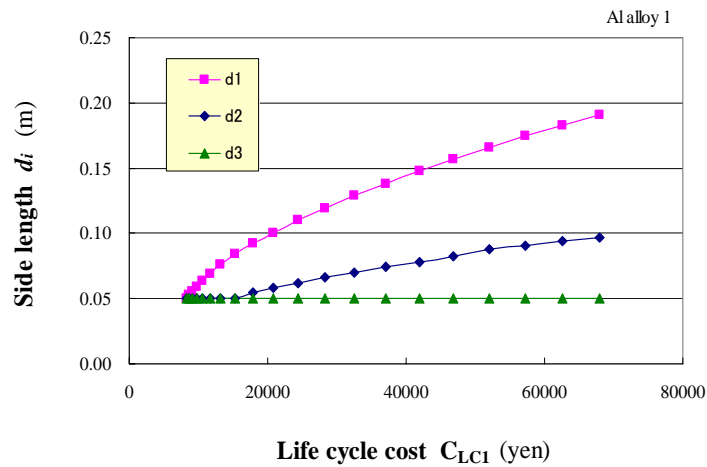


**Fig. 6-8** Optimum solutions of design variables vs. lifecycle cost  $C_{LC}$

次に動作精度と 6.2.3 節(2)項のライフサイクルコスト  $C_{LC1}$  に関して求めたパレート最適解を、普通鋼 1 とアルミ合金 1 の 2 つの場合を比較して、図 6-9 に示す。またこの内のアルミ合金 1 の場合の設計変数の最適解を図 6-10 に示す。



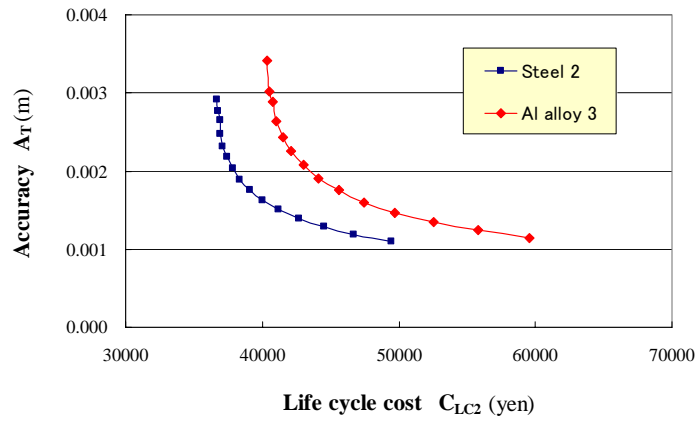
**Fig. 6-9** Pareto optimum solution sets for accuracy  $A_T$  and lifecycle cost  $C_{LCI}$



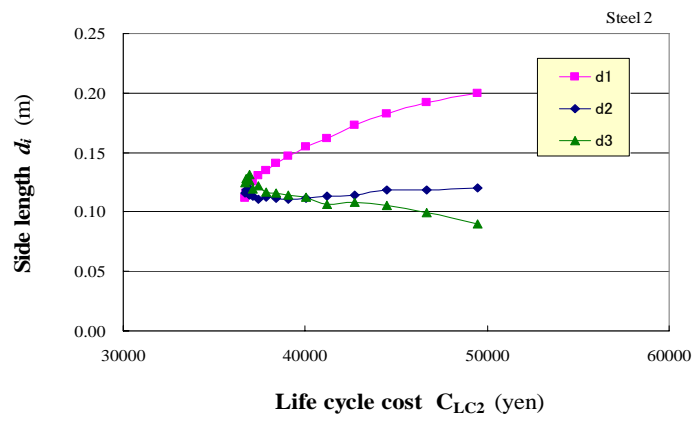
**Fig. 6-10** Optimum solutions of design variables vs. lifecycle cost  $C_{LCI}$

## 2) Reuse の最適化

Reduce の場合と同様に、動作精度と 6.2.3 節(3)項のライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  に関して求めたパレート最適解を、普通鋼 2 とアルミ合金 3 の場合について図 6-11 に示す。ここでライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  については、分解コストは設計変数の値に関わらず一定値のため除外した。また図 6-11 における普通鋼 2 の場合の設計変数の最適解を図 6-12 に示す。



**Fig. 6-11** Pareto optimum solution sets for accuracy  $A_T$  and lifecycle cost  $C_{LC2}$



**Fig. 6-12** Optimum solutions of design variables vs. lifecycle cost  $C_{LC2}$

## 6.4 解析結果の考察

先ず各ライフサイクルコストの相互関係について述べる．図 6-5 はメンテナンスコストに対する材料コスト，製造コストおよび製造コストと使用コストの和の関係を表しているが，図 6-6 と関連させてみると，設計変数の上限値と下限値で目的関数としての各コストが最大値または最小値をとる代表的なパレート最適解となっており，メンテナンスコストは明確に他のコストとトレードオフの関係にある．このためライフサイクルコストとして製造コストとメンテナンスコストを含む Reuse 最適化の場合は，図 6-12 に示すように，ライフサイクルコストが最小値をとるのは設計変数が下限値の時ではないことになる．

次に，Reduce 最適化と Reuse 最適化の場合の結果について考察する．

### 6.4.1 リデュース最適化の場合

先ず Reduce 最適化について，図 6-9 で示されるパレート最適解では，動作精度の値は 1 ～6 mm となっており，普通鋼とアルミ合金を比べると，アルミ合金 1 の方が優れた解となっている．動作精度を小さくするためにはライフサイクルコストが大きくなり，図 6-10 で示すパレート最適解における設計変数のグラフより，それは部材寸法の増加に対応している．すなわち，動作精度におけるオーバーラン距離を下げるためには，部材 1 の寸法  $d_1$  は上限値に近づくが，部材 2 および部材 3 の寸法  $d_2$ ,  $d_3$  は，むしろ上限値までにならない方が良い．Reduce 最適化におけるライフサイクルコストの内訳を，普通鋼 1 とアルミ合金 1 の場合について分析して示したものが図 6-13 である．

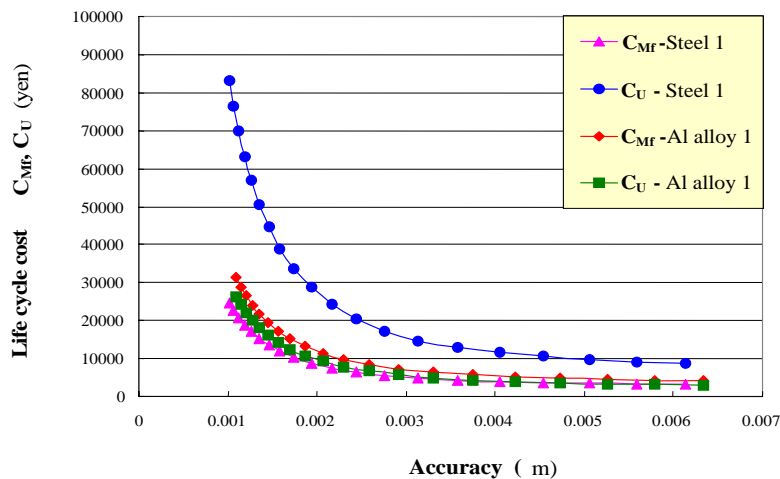


Fig. 6-13 Components  $C_{Mf}$  and  $C_U$  of lifecycle costs of two materials in Reduce optimization

これを見るとアルミ合金 1 の場合は，製造コストは普通鋼 1 より大きいですが，使用コストが約 1/3 と小さくなっており，そのためライフサイクルコストが小さくなって，パレート最適解としては普通鋼 1 より優れたものになっていると考えられる．そしてこの理由は，

アルミ合金の材料密度が普通鋼より小さく部材が軽いためである。

#### 6.4.2 リユース最適化の場合

次に Reuse 最適化の場合は，図 6-11 より Reduce 最適化の場合と反対に，普通鋼 2 の方が優れた解となっている．この場合のライフサイクルコストは製造コストとメンテナンスコストを合わせたものであり，使用コストは含んでいない．またその場合の設計変数の最適解を見ると，図 6-12 で示すように，ライフサイクルコストが最小値を取るのは設計変数が下限値の場合ではないということであり，さらにライフサイクルコストが最大の点では，部材 2 および部材 3 の寸法  $d_2$ ,  $d_3$  は，メンテナンスコストの関係から図 6-10 の Reduce の場合とは異なり，ライフサイクルコストが最小の点の値と同程度か少し減少気味になっている．Reuse 最適化におけるライフサイクルコストの内訳を，普通鋼 2 とアルミ合金 3 の場合について分析して示したものが図 6-14 である．これを見ると普通鋼 2 の場合は，製造コストはアルミ合金 3 より小さく，さらにメンテナンスコストもアルミ合金 3 より若干小さくなっているため，ライフサイクルコストがより小さくなって，パレート最適解としてはアルミ合金 3 より優れたものになっていると考えられる．そしてこの理由は，6.3.3 節の表 6-2 の材料特性で示すように，普通鋼 2 の材料単価がアルミ合金 3 に比べ大幅に低いことと，普通鋼 2 の材料強度はアルミ合金 3 より若干低いにも拘わらず，動作精度を同程度とすると部材寸法がアルミ合金より大きくなるため，メンテナンスコストがより小さくなることのためである．

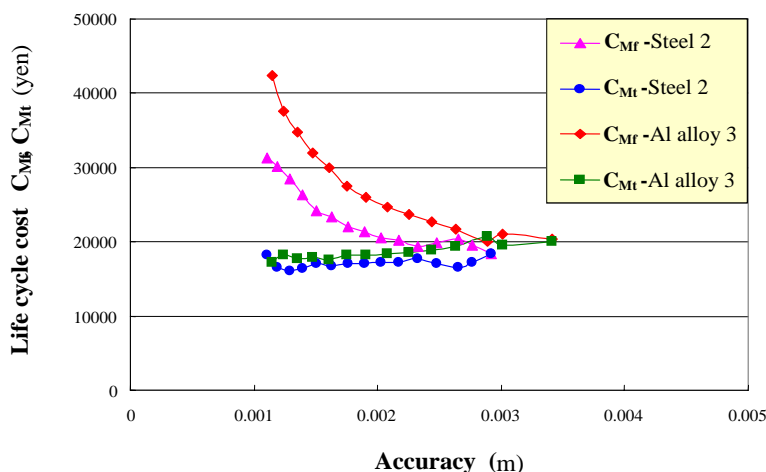


Fig. 6-14 Components  $C_{Mf}$  and  $C_{Mt}$  of lifecycle costs of two materials in Reuse optimization

以上，Reduce 最適化と Reuse 最適化という二つのパターンの解析結果について考察したが，これらの結果はいずれも両パターンが目指す特徴をよく表していると思われる．本解析手法を用いれば，材料の違いによるパレート最適解の変化を適切に把握することができ

るため、本手法は設計のブレークスルーのための探索手段としても有効なものであると考えられる。

## 6.5 結言

本章ではライフサイクルを考慮した機械製品の基本設計に関して、最適化の観点から定量的な意思決定に役立つ設計手法の提案を試みた。その結果を纏めると以下の通りである。

- (1) 3 R の考え方をライフサイクル設計の最適化に採用し、**Reduce** および **Reuse** を目的とする二つの最適化パターンを考えて、最適化の手順を提案した。
  - ・ 先ず使用材料の選定を行う。この解析では材料に関わる特性を設計変数にとり、部品寸法としては、**Reduce** または **Reuse** 最適化の設計解を参考にした代表的な寸法を用いて、製品性能と 2 パターン用に定義したライフサイクルコストの両面を評価することにより最適材料の候補を得る。
  - ・ 次に選定された材料について、部品寸法を設計変数として、**Reduce** を主目的とした最適化と **Reuse** を主目的とした最適化の 2 パターンの最適化を行う。これらの最適化解析では、目的関数として製品性能と **Reduce** または **Reuse** 用に設定したライフサイクルコストを用いて二目的最適化を行い、パレート最適解を得るというものである。
- (2) この手法の妥当性を検証すべく、適用例として一軸方向に移動する簡単なロボットモデルを対象にして、製品性能としてはロボットの動作精度を選び解析を行った。この結果、**Reduce** および **Reuse** 最適化の両パターンについて、動作精度とライフサイクルコストに関するパレート最適解ならびに対応する設計変数の最適解を得た。さらに、選定された材料の普通鋼とアルミ合金について、材料の特性値がライフサイクルコストに及ぼす影響の定量的な把握を行うことができた。
- (3) 今回提案した解析手法を用いれば、ライフサイクルコストを考慮する中で所望の動作精度を決定することが可能となるため、本手法は設計者にとって有用なツールになると思われる。

さらに今後は、本手法をライフサイクル特性の異なるその他の製品に適用して、その有効性を検証することが望まれる。

## 参考文献

- (1) 梅田 靖, ライフサイクルエンジニアリングの基本的な考え方, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.388-394.
- (2) 吉川弘之, ライフサイクルデザインの意義, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.383-387.
- (3) インバース・マニュファクチャリングフォーラム監修, 木村文彦ほか編, インバース・マニュファクチャリング ハンドブック, (2004), p.35, 丸善.
- (4) Alting,L., Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises, *Concurrent Engineering*, (1993), pp.1-17, John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Otto,K. and Wood,K., Design for the Environment, Product Design; Techniques in Reverse Engineering and New Product Development, (2001), p.720, Prentice-Hall.
- (6) Kuo,T.C., Huang,S.H. and Zhang,H.C., Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41, (2001), pp.241-260.
- (7) 高田祥三, 梅田 靖, 加藤 悟, ライフサイクルデザインへのロードマップ, 精密工学会誌, Vol.66, No.12(2000), pp.1853-1857.
- (8) Ogushi,Y., Kandlikar,M. and Dowlatabadi,H., Assessing product life cycle strategies in the Japanese market, *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, (2006), pp.49-64, Springer.
- (9) 小林英樹, 企業におけるライフサイクル設計支援, 計測と制御, Vol.43, No.5(2004), pp.425-428.
- (10) 増井慶次郎, Catherine M.Rose, 水原清司, 石井浩介, ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, 精密工学会誌, Vol.66, No.4(2000), pp.567-571.
- (11) Takeuchi,S., Saitou,K., Design for Optimal End-Of-Life Scenario via Product-Embedded Disassembly, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99475(2006).
- (12) Takai,S., A Lifecycle-Cost Model of Concept Testing, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99605(2006).
- (13) Cheung,W.M., Newnes, L.B., Mileham,A.R., Marsh,R. and Lanham,J.D., A study of Life Cycle Costing in the Perspectives of Research and Commercial Application in the 21<sup>st</sup> Century, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2007-34425(2007).
- (14) 山田篤史, 高田祥三, 設備ライフサイクルシミュレーションに基づく産業用ロボットの関節歯車の摩耗予測システム, 精密工学会誌, Vol.67, No.12(2001), pp.2010-2015.
- (15) 梅田 靖, 近藤伸亮, 杉野 隆, 製品のリユース可能性評価のための「限界リユース率」の提案, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.73, No.725(2007-1), pp.339-346.
- (16) 山田泰弘, 買手千香子, 古村義彰, パーツリサイクルにおける部品の組合せ最適化 (再生部品と新部品の混用), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.662(2001-10), pp.3339-3344.
- (17) Yoshimura,M., Design Optimisation for Product Life Cycle, *Design for X: Concurrent*

- Engineering Imperatives* (Edited by G.Q.Huang), (1996), p.424, Chapman & Hall.
- (18) Yoshimura,M., Hamada,T., Yura,K. and Hitomi,K., Design Optimization of Machine-Tool Structures with respect to Dynamic Characteristics, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol.105, March (1983), pp.88-96.
  - (19) 吉村允孝, モノづくりにおけるシステム設計最適化, (2007), p.37, 養賢堂.
  - (20) 例えば, 高田祥三, ライフサイクル・メンテナンス, (2006), p.53, (株)JIPM ソリューション.
  - (21) (社)精密工学会 超精密位置決め専門委員会監修, 次世代精密位置決め技術, (2000), p.176, フジ・テクノシステム.
  - (22) 井川直哉, 水本 洋, しゅう動体の停止挙動 - 工作機械の位置決め精度の基礎研究 (第1報) -, 精密機械, Vol.41, No.8(1975), pp.771-777.
  - (23) 山本敏男, 太田 博, 機械力学, (1996), p.50, 朝倉書店.
  - (24) Yoshimura,M., Takeuchi,Y. and Hitomi,K., Design Optimization of Machine Tool Structures Considering Manufacturing Cost, Accuracy and Productivity, *Transactions of the ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 106, 4(1984-12), pp.531-537.
  - (25) Cohon,J.L., *Multiobjective Programming and Planning*, (1978), pp.98-127, Academic Press, New York.
  - (26) Yoshimura,M., Hamada,T., Yura,K. and Hitomi,K., Multiobjective Design Optimization of Machine-Tool Spindles, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol.106, March (1984), pp.46-53.
  - (27) Das,I. and Dennis,J.E., Normal Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems, *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, Vol.8, No.3(1998), pp.631-657.



## 第 7 章 異なるライフサイクル特性をもつ製品に対するライフサイクル設計の最適化手法

### 7.1 緒言

これまでの章で述べてきたように、地球温暖化を緩和するべく低炭素社会を目指した持続的な発展を実現するためには、ベースとして資源やエネルギーの消費を抑えた循環型社会の実現が重要である。循環型社会においては、環境負荷を少なくして、製品の再使用や再利用を促進する循環型の生産を行うことが求められる。そして循環型生産をより良く行うためには、そのスタートとなる製品の設計において、ライフサイクル設計（以下 LCD と呼ぶ）が必要である<sup>(1)</sup>。

LCD においては、ライフサイクルの各段階で多くの評価項目が考えられ、さらにそれらの評価項目の中には互いにトレードオフの関係になっているものもあるため、それらの評価項目をどのような方法で処理をして最適な解を得るかが問題である。また、製品設計においては、与えられた制約の中で製品性能や製造コストなどのような要求項目をいかに最大限に実現するかという「最適化」の考え方が必要であり、これが最適設計の所以である。従って LCD においても、「全てのライフサイクル段階における多くの評価項目に対して、どのような手順で最適な設計を行えば良いか」ということが、非常に重要なテーマとなる。特に設計者にとっては、LCD を最適に遂行するための、定量的な意思決定を支援してくれるような設計支援システム手法の提供が要望される。

ところで、LCD における評価項目の中で、「コスト」は最も重要なものの一つであり、それ故に従来のライフサイクル設計の研究においても、LCC (Life Cycle Costing) という概念が定義され、全ライフコスト (Through-Life-Costing) やライフサイクルコストとしてモデル化やシミュレーションによる定量化の研究が数多く行われている<sup>(2-5)</sup>。筆者らも、このようなライフサイクル設計の最適化に関する問題に対して、これまでの章で述べたように、省エネルギーが問題となる製品や長期間に亘って使用される工作機械、さらに今後色々な分野で使用が拡大すると思われる工業用ロボットのモデルに対して、ライフサイクルコストを評価項目に選んで最適設計の方法論を展開してきた<sup>(6-8)</sup>。

本章ではこれまでの方法論を総括するべく、対象製品を広く捉えてそのライフサイクル特性に基づき分類し、それらのライフサイクル設計における定量的な意思決定を支援するような最適設計法を提案することを目的として、次のようなアプローチを採用した。すなわち、対象とする製品の特性や特徴によりライフサイクル設計の目標が異なるため、製品をその特徴が類似する製品群（タイプ）に分類した。本章では 4 種類の製品群を設定し、それぞれに対するライフサイクル設計の定式化における違いを示すとともに、各製品タイプに応じた最適化問題を解くことにより、それぞれの特徴を数理的に論じた。

以下、7.2 節ではライフサイクル設計に対する考え方を説明し、7.3 節では 4 つのタイプの製品に関するライフサイクル設計の最適化の手順と定式化の説明を行う。そして、7.4

節では適用事例を用いた解析結果と考察を示し、7.5 節で結言を述べる。

## 7.2 ライフサイクル設計の考え方

### 7.2.1 ライフサイクルにおける評価項目

ライフサイクル設計とは、その製品のライフサイクルを考えて、各ライフサイクル段階の要求事項を考慮し、それらを満足させながら製品の設計を行う、すなわち、設計解を求める（設計変数の値を決定する）ことである。ここで問題になるのは、①ライフサイクルとは何か、どの段階を考えるのか、②各段階における要求事項（評価項目とも言われる）とは何かということである。

製品のライフサイクル段階としては、一般的に言われているものは製品の企画、設計、製造、輸送、使用、メンテナンス、回収、分解・解体、再使用、再生、廃棄・埋立てなどであり<sup>(1)</sup>、各段階の評価項目としては、例えば次の表 7-1 に示すように、各段階のコストなど種々のものが考えられる。

**Table 7-1** Product's life cycle stage and evaluative items

Life cycle stage	Evaluative items	Optimization	Variables
design	function, performance	maximization	size, weight, material, structure
manufacturing	cost, energy proportion of parts reuse	minimization maximization	process parts longevity
use	cost (material, energy, etc)	minimization	condition
maintenance	cost (inspection, cleaning, repair) system reliability	minimization maximization	assembling structure parts longevity
abandonment collection	delivery (transportation) cost	minimization	volume, weight
disassembly dismantlement	cost easiness of assembly easiness of dismantlement	minimization maximization	parts number, structure (modular, connection type)
reuse recycling	proportion of parts reuse easiness of recycling, proportion of material recycling cost, waste quantity	maximization maximization maximization minimization	parts number, parts longevity, material, number of materials, assembling structure

### 7.2.2 ライフサイクルオプション

ライフサイクルオプションとは、製品のリユースやリサイクル、製品の長期使用など広い意味での循環経路であり、製品の一生で取り得る選択肢という意味でこのように呼ばれ

る<sup>(9)</sup>。ライフサイクルオプションは、製品の種類や部品の特徴などによって様々なものがあり、ライフサイクル設計では、どのようなライフサイクルオプションを重視するかという戦略が重要である。いわゆる3Rの考え方でライフサイクルオプションを分類した例を図7-1に示す<sup>(10)</sup>。

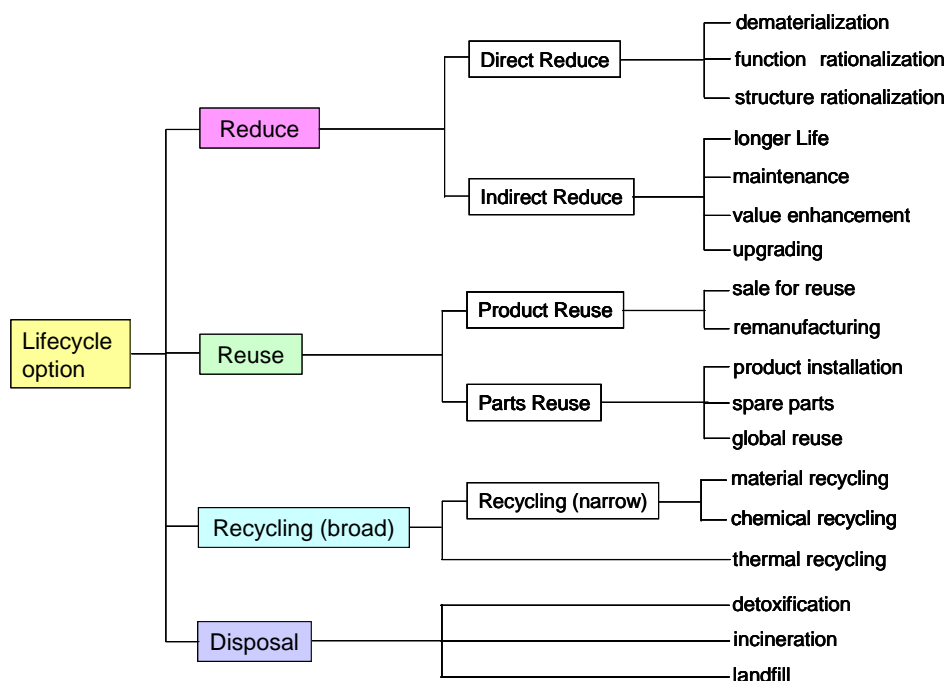


Fig. 7-1 Classification of Lifecycle Options

### 7.2.3 3R的考え方に基づく最適化

次に、ライフサイクル設計を最適に行うためには、最適設計の考え方が必要になる。最適設計とは、色々な制約条件の中で、ある評価項目を最大または最小にするような設計変数の解を求めることといわれる。

一般に製品設計とは、設計仕様（最低限満足しなければならない目標）を設定し、これを満足するように設計変数を決める活動であるが、そこにおいては制約条件がある。その代表的なものを挙げると、例えば、

- ①製造コスト
- ②大きさ（収納スペース、製品のサイズ）
- ③重量
- ④使用材料
- ⑤環境条件（温度、圧力、電圧、・・・など）
- ⑥環境に与える影響（環境負荷）・・・以下

等である。また、製品設計の目的は、所望の機能や性能をもつ製品を生み出すことであり、この機能や性能に『製品の価値』がある。従って、製品設計の目的は、価値のある製品を創ることであると言える。このような考え方に基づいて、ライフサイクル設計の「最適化

に関する方法論」を提案する必要がある。

ライフサイクル設計においては、ライフサイクルオプションやライフサイクルコンセプトという考え方がある。すなわち、製品のライフサイクルを考える上で、どのライフサイクル段階あるいはどの項目を重視するかということであり、例えばいわゆる3Rの考え方がある。Reduce, Reuse, Recycleの3Rは、循環型社会形成推進基本法で示されている概念であり<sup>(11)</sup>、廃棄物対策に関して3つのRの優先性が述べられている。すなわち、優先順位は①Reduce, ②Reuse, ③Recycleの順である。そこで、この概念を利用してライフサイクル設計の最適化に関する評価項目を整理することになると、以下のものが挙げられる。

- 1)Reduce …… (資源) 使用材料 (特に希少材料)  
(エネルギー) 製造用, 使用時, メンテナンス用
- 2)Reuse …… 再使用部品数, 再使用のためのコスト (分解, 清掃, 検査など),  
再使用部品の寿命, 再使用部品の再使用率 (適用先, 標準化設計など),  
Up-grade 可能性
- 3)Recycle …… 再利用可能材料 (再生技術の確立要), 再生コスト (リサイクルコスト;  
採算性の問題), 廃棄重量 (低減化必要)

最適設計のためには、これらの評価項目をどのように取り扱えばよいかについて、統一的な考え方を提示する必要がある。

このような観点に基づいた最適設計法の確立により期待される効果あるいはメリットとしては、

- (1)まず、資源を少なくして製品を製造することができる。さらに、使用エネルギーを少なく (環境負荷を少なく) して製品を使用することができる。  
(後者については、従来省エネ製品ということで設計・製造されている)
- (2)環境適合製品を最小のコストで製造することができる。
- (3)設計者は、製品の概念設計段階でこのような手法を用いることにより、少ない設計時間で (効率的に) 環境適合製品の設計検討を行うことができる。

## 7.3 4タイプの製品に対するライフサイクル設計の最適化

### 7.3.1 製品の分類と最適化の戦略

ライフサイクル設計の戦略を考える場合、その製品のライフサイクル特性を十分に理解しそれを反映させることが重要である。ここではライフサイクル特性の中で重要な項目である製品の「機能寿命」と「使用期間」に着目し、これらの要因により製品を分類してみる。すなわち、(1)機能寿命の長さ (技術革新の周期ともいえる) と、(2)製品が使用される期間である。それぞれの例を挙げると以下のようなものである。

- 1-a. 機能寿命が短いもの …… 携帯電話, パソコン
  - 1-b. 機能寿命が長いもの …… 鉄道, 橋, 住宅, 家具, ベッド, 自転車
- 同様に、
- 2-a. 使用期間が短いもの …… ペットボトル, 飲料缶, 包装用具
  - 2-b. 使用期間が長いもの …… 鉄道, 橋, 航空機, 工作機械, 住宅

家電製品については製品により異なり、冷蔵庫や洗濯機、エアコンなどは 2-b で、テレビや音楽・情報機器、コピー機などは、2-a と 2-b の中間位と思われる。また、自動車については、(1)と(2)のいずれの分類でも、中間位にあると考えられる。これらを整理し、最適設計の観点から必要な評価項目を加えると、表 7-2 のように表すことができる。

**Table 7-2** Classification of products based on functional longevity and usage period

Product Classification	Typical Product	Lifecycle Options & Evaluative Items	Required Characteristics
short usage period	PET bottle	reduce reuse recycling	low volume, low weight easy to clean, durable easy to recycle
short to medium usage period (short functional longevity)	mobile phone, personal computer	product performance recycling	upgradeable easy to disassemble and sort parts, easy to recycle parts
short to medium usage period	industrial robot  copier	product performance maintenance cost reuse	motion stability, reliability durability of product and parts easy to disassemble, durable
medium usage period  (medium functional longevity)	home appliances   automobile	operating efficiency maintenance cost recycling  recycling	energy saving function durability of product and parts easy to disassemble and sort parts, easy to recycle parts easy to disassemble and sort parts, easy to recycle parts
long usage period (long functional longevity)	machine tool rail vehicle, aircraft  bridge	operating energy product performance maintenance cost maintenance cost	weight of moving parts reliability durability of product and parts durability of product and parts

表 7-2 における 4 つの代表的な製品区分に対して、ライフサイクル設計の戦略を考えると以下のようになる。

- A. 機能寿命が短く、使用期間が短い製品は、リユースを考えず、最初に Reduce、廃棄後は材料リサイクルを考えた設計にすべきである。
- B. 使用期間が短い製品でも、あまり設計変更がなされない（製品のデザインや機能が変化しない）製品の場合は、使用終了後（廃棄後）にリサイクルよりも環境負荷の低い

リユースを検討すべきである。 → 例えば、食器やペットボトルの Reuse

- C. 使用期間が長い製品の場合は、使用に要するエネルギーやメンテナンスコストの低減を考慮すべきである。この場合で製品の機能寿命が短い時は、途中でニーズに合わず製品が使用できなくなるが、Up-grade 性を持たせて、できるだけリユースを行うべきである。
- D. 使用期間が長く、かつ機能寿命も長い製品の場合は、一旦製造するとほとんど設計変更もないので、使用に要するエネルギーやメンテナンスコストの低減を最重点で設計すべきである。この場合は、初期コストが多少高くても、使用とメンテナンスの段階、廃棄時のリサイクル性を考慮して設計すべきである。

上記の4つの製品区分について主な評価項目を整理すると、表 7-3 のようになる。

**Table 7-3** Evaluative items of four categories of products

Category	Evaluative items	Direction to be aimed
A	manufacturing cost, disposal cost, recycling cost	Reduce, Recycling
B	manufacturing cost, reuse cost, recyclability (It is much better if the product is recyclable.)	Reuse, Reduce
C	usage cost, maintenance cost, up-grading cost, recyclability	Reduce, Reuse
D	usage cost, maintenance cost, recycling cost	Reduce, Recycling

この表から、次のことが言える。

- 1) リサイクル性（またはリサイクル可能性）は全ての場合に関係しており、使用する材料や部品がリサイクルできるか否かは重要なファクターである。従って、設計においては、できる限りリサイクルできる材料を使用する案を考え、どうしてもリサイクルができない場合は、その材料の使用を最小限にすべきである。
- 2) 評価項目の各コストが相互にどんな関係にあるのか、すなわち、比例関係かトレードオフの関係かを吟味しなければならない。それによって、目的関数をどのように設定するかが変わってくる。例えば、使用コストが製品の重量に比例するような場合は、製造コストと使用コストが比例するが、省エネ性を向上させるためには製造コストが増加するような場合には、製造コストと使用コストはトレードオフの関係となる。  
さらに、メンテナンス性（耐久性、分解容易性）や Up-grade 性を高めてそれらに関わるコストを下げるために、製造コストが増加することがある。この場合もトレードオフの関係となる。

ここで、ライフサイクル各段階のコストについての一般論を述べると次の通りである。

- ・メンテナンスコストは、一般的には製造コストとトレードオフになることが多い。すなわち、メンテナンスフリー化を進めようとする、初期コストが増加することが多い。

- ・使用コストは、移動する製品などのように、使用エネルギーがその製品の重量による場合は製造コストと比例関係となるが、家電製品などのように、消費エネルギーが動力源の制御方式に依存するような場合は、逆に製造コストとトレードオフになることがある。
- ・ペットボトルなどの容器類は、使用段階のコストとしては、輸送コストが問題になる。従って、軽いこと、容積が少ないことが要求される。ペットボトルが有用とされるのは、透明で中が良く見え、軽いため（比重は 1.38）であり、強度的には 1 回の使用に耐えられれば良いという条件で設計されている。しかし製品の Reuse を考えるならば、何回もの輸送や使用に耐えられるように、強度の向上も必要である。
- ・Reuse を考える際は、製品の寿命（機能寿命を指すことが多い）が問題になる。耐用寿命後の Reuse については、製品自体はそのままでは使用できず、その状態で再使用できるのは部品である。

以上の検討より、最適設計の議論を進めるためには、製品区分毎の代表的な製品を対象にして、ライフサイクル設計の戦略（またはシナリオ）を記述することが必要である。その場合、製造コストを軸として考え、その他のコストは製造コストとどのような関係にあるかを調べて、それらの組合せや優先性を決定することにする。表 7-2 の製品区分の製品にこの考え方を適用して表 7-3 を再度整理すると、下表 7-4 が得られる。

**Table 7-4** Important evaluative items and their interrelationship

Product category	Proportional (group 1)	Conflicting (against group 1)	Independent
A (short usage : Recycle)	material cost, transportation cost, recycling cost	reuse cost	usage cost, maintenance cost
B (short usage : Reuse)	material cost, reuse cost, recycling cost	maintenance cost	
C (long usage : Reuse)	material cost, usage cost, recycling cost	maintenance cost	reuse cost
D (long usage : Recycle)	manufacturing cost	usage cost, maintenance cost	recycling cost

次に、この製品区分毎のライフサイクルコストを定式化することが必要となる。

### 7.3.2 最適化の手順と定式化

本研究はライフサイクル設計の最適化を目的としているが、そのためには上述した評価項目をどういう順序で最適化して行くかを示さなければならない。3 R 的考え方によれば優先度は Reduce, Reuse, Recycle の順であるから、この観点から、最適化の順序として次のように考えることとする。

## [最適化の順序]

### Reduce 設計

1. 製造に使用する材料資源（材料コスト：これは廃棄する資源に繋がる）を最小にするように設計する。（必要な機能，製造コストは制約条件） → 軽量化設計
2. 製造に要するエネルギーを最小にするような製造法を選択する（これは，製造時の環境負荷を最小にすることであり，ライフサイクルアセスメント：LCA の問題である）。
3. 製品の保管や輸送時のコストが最小になるように，製品を設計する。  
→ 低容積・軽量化設計
4. その製品を使用する場合の使用エネルギー（使用コスト）が最小になるように，製品を設計する。  
→ 省エネ設計
5. その製品を使用中のメンテナンスコストが最小になるように，製品を設計する。  
（耐用寿命の向上，部品・製品の長寿命化） → 長寿命化設計
6. 製品が廃棄された時，回収や収集作業が最小コストでなされるように，製品を設計する。

### Reuse 設計

7. 廃棄された製品はできるだけ再利用が可能とし，埋立てが最小になるように製品を設計する。
8. 廃棄された製品は，清掃・検査をして出来るだけ再使用を行う。この時，再使用に要するコストが最小になるように，製品を設計する。再使用を推進するためには，耐用寿命の向上が必要である。
9. 部品の再使用をやり易くするために，部品への分解や部品の取り外しなどのコスト（再使用コスト）が最小になるように，製品を設計する。

### Recycle 設計

10. 再使用が出来ない部品や製品は，できるだけリサイクルが可能なように，製品を設計する。この場合のリサイクルは材料の再生(Material recycling)であり，これが不可の場合は，燃焼してエネルギーを取り出す(Thermal recycling)ことが可能で，かつこの時の再生に要するコストが最小になるように，製品を設計する。

以上をライフサイクル段階のコストと関係づけて整理すると，

- 1)Reduce 設計 ・ ・ ・ 軽量化設計，小型化設計，省エネ設計，長寿命化設計  
製造コスト（材料コスト），使用コスト，メンテナンスコスト
- 2)Reuse 設計 ・ ・ ・ (長寿命化設計)，易分解設計，易部品検査設計  
メンテナンスコスト，分解コスト，部品整備コスト
- 3)Recycle 設計 ・ ・ ・ 易解体設計，再生容易設計  
回収コスト，解体コスト，材料再生コスト

以上の内容を，各ライフサイクル段階の評価項目の優先性と相互関係（比例関係か競合



関係か)を考慮して、どのような処理のフローに表すかを考える必要がある。但し、これは製品のライフサイクル特性やライフサイクル戦略により異なる。

代表的な4つの製品区分に対するライフサイクル設計の戦略に基づき最適設計を具体的に進めるため、次に示すようなより詳細なシナリオを考えた。

#### 代表的な製品のライフサイクルシナリオ

1. 短期間使用(1年以内)の製品で、出来るだけ投入資源を少なく製造し、使用終了または機能寿命の終了後は廃棄され、リサイクルに回されるとする。

[短期使用・リサイクル型 … 単一材質、分解なし]

この場合は、製造コストと回収コスト、再生コストの最小化を目指して設計する必要がある。

2. 短期使用の製品であり、製品の耐用寿命は使用期間より長いため製品の故障修理は不要で、使用終了後は再使用ができるように整備して、再使用を行う。但し、再使用が不可能になった後は廃棄し、リサイクルに回す。

[短期使用・製品リユース・リサイクル型 … 分解なし]

この場合は、製造コストは制約条件として、製品の耐用寿命最大化と再使用のためのコスト(清掃・検査)の最小化(第1次)を目指して設計する。最後のリサイクル(材料再生)については、可否の場合を検討し、可の場合は再生コストの最小化(第2次)を目指す。

3. 長期使用だが機能寿命がそれ程長くない(3年位の)製品の場合は、使用コストを抑えると共に、製品をできるだけ長く使用できるように、部品の耐用寿命を延ばしてメンテナンスコストを抑えると共に、機能寿命終了後はできるだけ部品の再使用を行う。

[長期使用・ロングライフ、部品リユース・リサイクル型 … 分解あり]

この場合は、先ず使用コストの最小化(第1次)を目指し、次にメンテナンスコストおよび再使用コストの最小化(第2次)を目指して設計する。リサイクル(材料再生)についてもその可否の場合を検討し、可の場合は再生コストの最小化(第3次)を目指す。

4. 長期使用で機能寿命も長い(10年位の)製品の場合は、使用とメンテナンスコスト(この場合は部品の取替え)が重要となる。また、製品耐用寿命後の廃棄時には、リサイクルが可能なように設計する。

[長期使用・リサイクル型 … 分解あり]

この場合は、製造コストを制約条件として、使用コストとメンテナンスコストの最小化(第1次)を目指し、次にリサイクルコストの最小化(第2次)を目指して設計する。

上記のシナリオに基づいて、4つの製品タイプについて最適化すべき評価項目と最適化の順序を整理すると表7-5のようになる。

**Table 7-5** Optimization order of the four product types

Product Type	First	Second	Third
A	manufacturing cost	collection cost, recycling cost	
B	product physical longevity, reuse cost, manufacturing cost (constraint)	recycling cost	
C	operating cost, manufacturing cost (constraint)	maintenance cost reuse cost	recycling cost
D	operating cost, maintenance cost, disassembly cost, manufacturing cost (constraint)	recycling cost	

例えば、最近話題になっているペットボトルの「リユース化」については、製品 B のタイプに該当する。単にマテリアルリサイクルする場合（製品 A タイプ）に比べて、どの位メリットがあるのかを検討することが出来る。

次に、第 6 章の適用例で述べた直交座標ロボットモデルを対象にした場合に、ライフサイクルコストの定式化について検討した結果を表 7-6 に示した。ここで設計変数は、部材の断面寸法を表す  $d_i$  である。

**Table 7-6** Formulations of lifecycle costs

Lifecycle stage cost	Formulation	Design for X
Material cost number of parts: $n$	$C_{M1} = W \times \alpha_j = \sum_{i=1}^n \rho_j S_i l_i \times \alpha_j = \rho_j \alpha_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2$	Light-weight design
Machining cost machining unit cost: $U_u$	$C_{M2} = U_u \times \sum_{i=1}^n 2d_i^2$ ( $U_u$ depends on only the roughness of machined surface.)	
Assembling cost all number of parts assembled: $N_a$ assembling unit cost: $a$	$C_A = N_a \times a$	
Manufacturing cost ; (material + machining + assembling)	$C_{Mf} = C_{M1} + C_{M2} + C_A = \sum_{i=1}^n (\rho_j \alpha_j l_i + 2U_u) d_i^2 + N_a \times a$	
Usage cost use period: $T$ moving distance: $L$ energy unit price: $E_{uc}$	$C_U = k_1 V \times \left( \frac{V^2}{L} + 2\mu_d g \right) \times \rho_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2 \times T E_{uc}$	Energy-saving design

Maintenance cost repair unit cost: $r$	$C_{Mt} = r \times T / L_P = rT \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} = \frac{rT}{k\sigma_B} \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}$	High reliability design
Disassembling cost all number of parts disassembled: $N_{da}$ disassembling unit cost: $b$	$C_{DA} = N_{da} \times b = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_i$	Easy disassembly design
Parts maintenance cost maintenance unit cost: $c$	$C_{PM} = N_{da} \times c = \sum_{i=1}^{N_{da}} c_i$	Easy part-inspection design
Reuse cost	$C_{RU} = C_{DA} + C_{PM} = \sum_{i=1}^{N_{da}} (b_i + c_i)$	Reuse design
Collection cost transportation unit cost: $t$	$C_{Cl} = W \times t = \rho_j t \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2$	Light-weight and low volume design
Dismantling cost number of parts dismantled: $N_{DC}$ mean cost: $\overline{C_{dc}}$	$C_{DC} = \sum_{i=1}^{N_{DC}} C_{dci} = \overline{C_{dc}} \times N_{DC}$ ( $C_{dci}$ is an individual dismantling cost.)	Easy dismantlement design
Recycling cost	$C_{RC} = W \times \beta_j = \sum_{i=1}^n \rho_j S_i l_i \times \beta_j = \rho_j \beta_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2$	Easy recycling design
Total recycling cost	$C_{TRC} = C_{Cl} + C_{DC} + C_{RC}$	Recycle design

ここで、分解コストおよび解体コストの定式化について、さらに詳しく検討する。

- 1) 分解単価、部品整備単価を設計変数  $d_i$  で表わせば最適化解析に組み込める。1 案としては、分解単価（部材  $i$  の分解コスト）を 1 次式、整備単価を 2 次式で表わす。すなわち、

$$b_i = b_1 d_i, \quad c_i = c_1 l_i d_i \quad \text{と仮定する。従って} \quad C_{DA} = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_1 d_i, \quad C_{PM} = \sum_{i=1}^{N_{da}} c_1 l_i d_i$$

（理由）分解コストは、締結部の数に比例し、締結部の数は部材端部の周囲長さに比例すると考える。また、整備コストは、部材の全表面積に比例すると考える。

- 2) 分解単価の別表現として、 $d_i$  以外の変数を採用する。

**Reuse** は、ペットボトルなどのような製品リユースと部品リユースに区分できると考えられる。そして部品リユースでは、リユース対象部品を分解すると仮定する。

この時、分解コストは次のような関数で表される。

$$\text{分解コスト } C_{DA} = f_n \{ \text{分解部品数, 締結度} \}$$

ここで締結度を  $\theta$  で表し、例えば締結の強さに対応して次のように 4 段階を仮定する。

$$\text{すなわち, } \theta = \{1, 2, 3, 4\}$$

3) 解体コストとは、再生に必要な単位まで製品を分解することを意味し、表 7-6 では、解体される数を  $N_{DC}$ 、各解体単位に要するコストを  $C_{dci}$  としている。解体数  $N_{DC}$  については、使用される材質の種類に関係すると考えられる。すなわち、解体コストを問題にするのは、材質が多種類使用されている場合である。また、解体コスト  $C_{dci}$  は、解体される部分の結合方式や被解体物の重量などに比例すると考えられる。すなわち、

$$\text{解体コスト } C_{DC} = f_n \{ \text{解体数, 結合度} \}$$

ここで結合度を  $\varphi$  で表し、例えば結合の強さに対応して次のように 3 段階を仮定する。

$$\text{すなわち, } \varphi = \{1, 2, 3\}$$

上記のように、部材寸法以外に新たな決定変数として、部品の締結度、部品の結合度を導入する。

分解および解体コストの定式化のために、部品の結合方式について場合分けを検討する。

- 1) 溶接, リベット結合 ; 分解不可, 部品の再使用を考えた設計では不採用. 製品の再使用では可. 解体のためには, 切断などが必要.
- 2) 嵌合い・カシメ方式 ; 圧入や焼嵌めなどがあり, 軽度のものは分解可能. しかし, タイトに結合しているものは分解が困難. 解体のためには, 切断などが必要.
- 3) ネジ結合 (ボルト使用); 分解可能, 部品の再使用は可能. 但し, 結合部分の加工費は大.

これらのことから、分解コストの段階（分解のし易さに対応）として例えば、(1, 2) の 2 段階を選ぶと、それに対応して、結合部分の加工費も (1, 2) の 2 段階になると考えられる。すなわち、部品の再使用を考えたモデルでは、部品の加工費として結合部分の加工費を含めることにする。結合部分の加工費の算出については、結合方式による係数：結合度  $\varphi$  を用い、加工費は基準値にこの係数を掛けることによって算出する。また同様に、分解費についても係数：締結度  $\theta$  を用いることとして、これらの例を表 7-7 に示す。

**Table 7-7** Connecting methods and the coefficients of machining and disassembling costs

Connecting methods	coefficients of machining cost: $\varphi$	coefficients of disassembling cost: $\theta$
Welding	1.0	not disassembled
Fitting, Caulking	1.5	not disassembled
Screw connecting 1	2.0	2.0
Screw connecting 2 (easier disassembling)	3.0	1.0

一般的にネジ結合の場合は、ボルトの数を増やすと加工費は増加し、分解コストも増加する。そして部材寸法（ここでは断面積を考慮する）と必要なボルト数は比例し、部材寸法が大きくなるほどボルト数は多くなると考えられる。そこで、ボルトの数を減らして分

解を容易にするために、結合部に分解可能な嵌め合い（インロー）を付与するなどの方法を考えると、その場合は分解が容易になる代わりに結合部の加工費が増加することになる（その例が上表 7-7 のネジ結合 2 の場合である）。

これらの係数を用いて、加工コスト、分解コストを定式化する。なお、加工コストにおいて結合方式を考慮することによって、製造コストは「材料コスト＋加工コスト」と考える。すなわち、部品の組立コストは考慮しない。

・加工コスト；  $C_{M2} = U_u \times \sum_{i=1}^n 2d_i^2 \times \phi$  （但し、全ての結合部の加工費係数は同じ  $\phi$  とした）

・分解コスト；  $C_{DA} = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_i d_i^2 \times \theta$  （但し、全ての結合部の分解費係数は同じ  $\theta$  とした）

従って、製造コストは、  $C_{Mf} = C_{M1} + C_{M2} = \sum_{i=1}^n (\rho_j \alpha_j l_i + 2U_u \phi) d_i^2$

また、再使用コストは、  $C_{RU} = C_{DA} + C_{PM} = \sum_{i=1}^{N_{da}} (b_i + c_i) = \sum_{i=1}^{N_{da}} (b_i \theta d_i^2 + c_i l_i d_i)$

解体コストについては、次のように考える。解体とは、切断や破断などの方法で同じ材質のものに分けることであり、その後さらに適当な大きさに破砕する。従って、切断時には部材の断面積が、破砕時には部材の体積がそのコストに関係すると考えられる。

今、使用されている材質の数を  $N_M$  とし、解体方法として切断を考える（解体箇所は、基本的には結合部近辺になる）と、解体コストは次のように表される。

$$C_{DC} = \sum_{i=1}^{N_M} C_{dci} = \sum_{i=1}^{N_M} k_2 \sigma_B d_i^2$$

ここで  $k_2$  は定数であり、解体基準費を含めている。また  $\sigma_B$  は材料の破断強度である。従って、全リサイクルコスト（回収＋解体＋再生）は、次のように表される。

$$C_{TRC} = C_{CI} + C_{DC} + C_{RC} = \sum_{i=1}^n (t + \beta_j) \rho_j l_i d_i^2 + \sum_{i=1}^{N_M} k_2 \sigma_B d_i^2$$

## 7.4 適用モデルを用いた解析

本節では、7.3 節で述べた 4 種のタイプの製品の適用例として、プラスチックボトルと簡単な移動ロボットを用いた解析について述べる。製品タイプにおける製品 A と製品 B の対象としては、プラスチックボトルを選び、製品 C と製品 D の対象としては、一軸移動ロボットを選ぶものとする。

### 7.4.1 プラスチックボトル

プラスチックボトルの最適設計を検討した過去の研究<sup>(12-14)</sup>では、縦圧縮強度や減圧強度、スクイズ力のような基本的な性能を評価項目として採用しているが、本章では製品性能として、ボトル縦方向圧縮時の座屈強さを考えることとした。これに関しては牛島らの研究<sup>(15)</sup>があり、そこでは弾性問題の場合、薄肉円筒の座屈時の初期ピーク応力は、弾性座屈応力により評価できるとしている。薄肉円筒の弾性座屈応力は、S.P.Timoshenko により理論的に下記の式で与えられている<sup>(16)</sup>。

$$\sigma_{cr} = \frac{Eh}{a\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (7.1)$$

ここで、 $h$  は円筒の肉厚、 $a$  は円筒の平均半径、 $\nu$  はポアッソン比である。

薄肉円筒では円筒端面の軸方向応力が  $\sigma_{cr}$  になった時に座屈が発生する。従って、この座屈応力の値が大きくなるほど座屈が生じ難い構造であると言えるので、本研究ではこの応力を製品性能として一方の目的関数に選ぶ。

次に、ボトルのライフサイクルコストを定式化するために、ボトルの形状および設計変数を図 7-2 の概略図に示したように設定する。

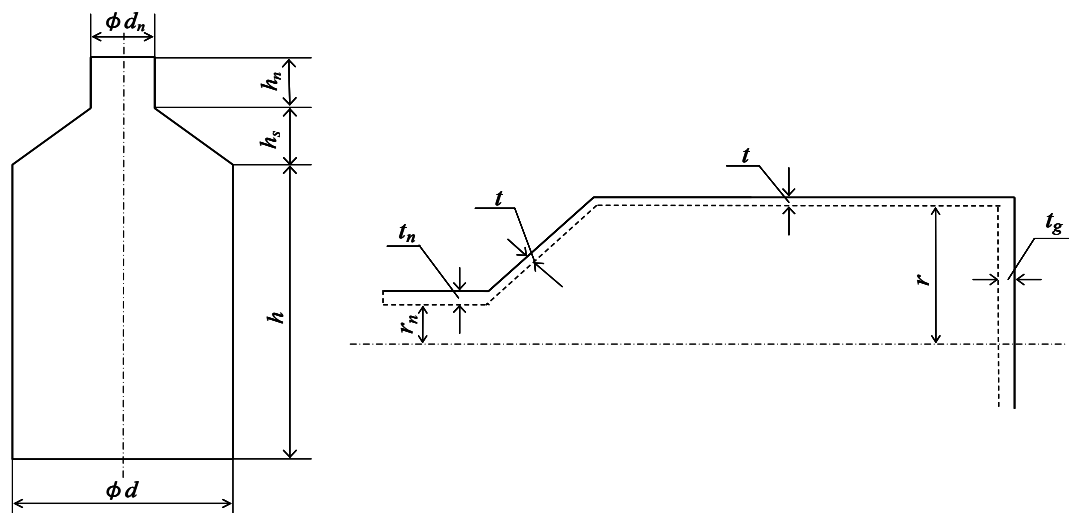


Fig. 7-2 Schematic view of plastic bottle model

制約条件としてのボトル各部寸法の範囲（設計変数の範囲）については、以下の通りとする。

$$h = 135.0 \sim 155.0 \text{ [mm]}, \quad t = 0.5 \sim 1.0 \text{ [mm]},$$

$$d = 65.0 \sim 75.0 \text{ [mm]}, \quad \text{従って, 内半径は, } r = 31.5 \sim 37.0 \text{ [mm]} \quad \text{となる.}$$

また, その他の寸法は下記の通り固定値とする.

$$d_n = 25.0, \quad r_n = 10.0, \quad t_n = 2.5, \quad h_n = 25.0, \quad h_s = 35.0, \quad t_g = 2.0 \text{ (単位は, mm)}$$

プラスチックボトルの材質は, ポリプロピレンとする. 材料単価と再生処理単価は, 材料の一般販売価格や再生樹脂価格のデータ<sup>(17)</sup>を参考にして仮定した. ポリプロピレンの材料特性およびこれらの単価を表 7-8 に示す.

**Table 7-8** Material properties and process unit costs for plastic bottle

Young's modulus $E$ [MPa]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Poisson's ratio	Material unit cost [yen/g]	Recycling unit cost [yen/g]
447	0.89	0.29	0.125	0.050

製品 B のモデルに適用する場合には, 再使用コストとしてはボトル内表面の清掃費 (内表面の面積に比例する) を計上すること, また再使用を可能にするための適当な制約条件 (耐久性を増すために肉厚の下限値を設定することなど) を追加することが必要である.

以下に, 解析に用いた計算式を示す. (但し, 各式の誘導の詳細な記述は省略した)

#### (1) ボトルの外形容積

ノズル部体積  $V_n$ , 胴部体積  $V_B$ , 肩部体積  $V_S$  を計算して, ボトルの外形容積  $V$  は, 次式により求められる.

$$\begin{aligned} V &= V_n + V_B + V_S \\ &= \frac{\pi}{12} \left\{ (3h + h_s) d^2 + h_s d_n d + (3h_n + h_s) d_n^2 \right\} \end{aligned} \quad (7.2)$$

#### (2) ボトルの質量

ボトルの質量  $W$  は, ノズル部, 胴部, 肩部の各部の外表面積に各部の肉厚を乗じて材料の体積を求め, さらに材料密度  $\rho$  を乗じることによって求められ, 次式のように表される.

$$\begin{aligned} W &= (S_n \times t_n + S_S \times t + S_B \times t + S_g \times t_g) \times \rho \\ &= \frac{\pi \rho}{4} \left\{ t_g d^2 + t(d + d_n) \sqrt{(d - d_n)^2 + 4h_s^2} + 4(dht + d_n h_n t_n) \right\} \end{aligned} \quad (7.3)$$

#### (3) ボトルの内容容積

ボトル内容積  $V_i$  は外形容積から材料体積を引いて求める. 従って,

$$V_i = V - \frac{\pi}{4} \left\{ t_g d^2 + t(d + d_n) \sqrt{(d - d_n)^2 + 4h_s^2} + 4(dht + d_n h_n t_n) \right\} \quad (7.4)$$

#### (4) ボトルの内表面積

再使用コストを算出するために, ボトルの全内表面積  $S_I$  を定式化する. これらの式は, 外表面積の計算式において, 対応する内寸法を代入することによって得られる. 結果として, ボトルの全内表面積  $S_I$  は, 次式で表される.

$$\begin{aligned}
S_I &= S_{ni} + S_{Bi} + S_{gi} + S_{Si} \\
&= \frac{\pi}{4} \left\{ 8r_n h_n + 4(d-2t)h + (d-2t)^2 + (d-2t+2r_n) \sqrt{(d-2t-2r_n)^2 + 4h_s^2} \right\}
\end{aligned} \tag{7.5}$$

次にライフサイクルコストの定式化を行うために、ライフサイクルの各段階におけるコストを求める。

### 1) 製造コスト

本来製造コストは材料コストと加工コストの和であるが、ここでは加工コストであるボトルの成形コストは考えず、材料コストのみを考えることにする。従って材料単価を  $\alpha$  で表すと、製造コスト  $C_{Mf}$  は次式となる。

$$C_{Mf} = W \times \alpha \tag{7.6}$$

### 2) 再生コスト

再生コスト  $C_{RC}$  は、製品を廃棄した後に材料として再生処理する費用であり、再生処理単価を  $\beta$  で表すと、製造コストと同様に次式で表される。

$$C_{RC} = W \times \beta \tag{7.7}$$

### 3) 再使用コスト

再使用のためのコストとしては、ボトル内面の洗浄と検査を考慮し、そのコストは内面の表面積と単位表面積当りの清掃費（清掃単価  $c_1$ ；検査を含む）の積で表されると仮定する。従って、1 回当りの再使用コスト  $C_{RU}$  は、ボトルの全内表面積  $S_I$  を用いて、次のように表される。

$$C_{RU} = S_I \times c_1 \tag{7.8}$$

以上により、製品 A の場合のライフサイクルコスト  $C_{LC1}$  は、次式とする。

$$C_{LC1} = C_{Mf} + C_{RC} \tag{7.9}$$

また、製品 B の場合のライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  は、再使用コストを含めた次式とする。

$$C_{LC2} = C_{Mf} + C_{RU} + C_{RC} \tag{7.10}$$

他方、ライフサイクルコストに対抗するもう一方の目的関数としての座屈応力は、式(7.1)より次式で示され、望大特性である。

$$\sigma_{cr} = \frac{2Et}{(d-t)\sqrt{3(1-\nu^2)}} \tag{7.11}$$

以上の定式を用いて、製品性能とライフサイクルコストに関する二目的の最適化解析を行う。



#### 7.4.2 直交座標ロボット

製品 C および D の対象として選んだものは、図 7-3 に示すような直交座標の一軸方向を移動するロボットのモデルである。このロボットは、3つの部材と直線上を移動する送り装置で構成されており、各部材は正方形断面を持った梁で、それぞれの長さは 0.7, 0.5, 0.2 [m] とする。送り装置は部材 1 に付随したものであるが、解析においてはその形状や重量は考慮しないこととする。このロボットは、Y 軸方向のある距離を一定速度で往復移動し、部材 3 の先端に移動方向の外力を受けるものとする。

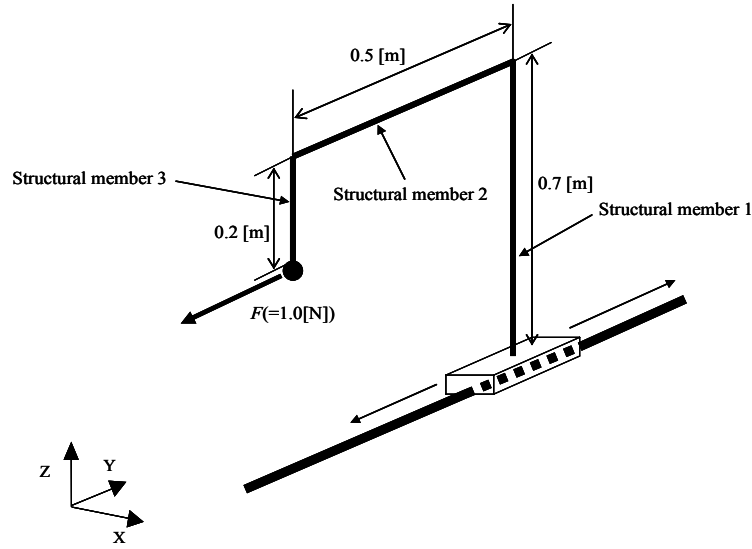


Fig. 7-3 Model of an axial robot

本モデルにおける各ライフサイクルコストの定式表現を以下に示す。設計変数は3つの部材の断面の一辺寸法  $d_i$  であり、定式化の詳細は第6章 6.3.2 節の内容に準拠している。

- 1) 製造コスト； 材料コスト+加工コスト とする（組立コストは設計変数に依存しないため除いた）。

$$C_{Mf} = C_{M1} + C_{M2} = \sum_{i=1}^n (\rho_j \alpha_j l_i + 2U_u) d_i^2 \quad (7.12)$$

- 2) 使用コスト； ロボットが、使用期間  $T$  において移動距離  $L$  を等速度  $V$  で往復運動する場合の所要エネルギーであり、加速分も含んでいる。 $E_{uc}$  はエネルギー単価である。

$$C_U = k_1 V \times \left( \frac{V^2}{L} + 2\mu_d g \right) \times \rho_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2 \times T E_{uc} \quad (7.13)$$

- 3) メンテナンスコスト；  $C_{Mt} = r \times T / L_P = rT \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} = \frac{rT}{k\sigma_B} \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}$  (7.14)

$$\text{製品耐用寿命； } L_P = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{k\sigma_B d_i^2} \quad \text{部材耐用寿命； } L_i = kS_i \sigma_B$$

ここで、 $r$ ：修理費単価，  $\sigma_B$ ：材料強度，  $k$ ：係数

- 4) 再使用コスト； 分解コスト+部品整備コスト とする。

分解コストは締結部の数に比例し、この場合、締結部の数は部材端部の断面積に比例すると仮定する（7.3.2 項の p.101 参照）。また部品整備コストは、部材の全表面積に比例すると考え、分解単価（部材  $i$  の分解コスト）並びに整備単価を 2 次式で表わす。

すなわち、 $b_i = b_1 d_i^2$  および  $c_i = c_1 l_i d_i$  と仮定すると、各コストは次式で表される。

$$\text{分解コストは、 } C_{DA} = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_i = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_1 d_i^2, \text{ 部品整備コストは、 } C_{PM} = \sum_{i=1}^{N_{da}} c_i = \sum_{i=1}^{N_{da}} c_1 l_i d_i$$

従って、再使用コストは

$$C_{RU} = C_{DA} + C_{PM} = \sum_{i=1}^{N_{da}} (b_1 d_i + c_1 l_i) d_i \quad (7.15)$$

- 5) 回収コスト； このコストは、製品を運搬するコストと考えると、製品の重量に比例するため下式のように表されるが、運送単価は距離に依存するため一概に決定されない。またこのコストは、メーカーが引取り価格として一定金額にしている場合もある。重量当りの運送単価を  $t$  で表すと、回収コストは、

$$C_{CI} = W \times t = \rho_j t \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2$$

- 6) 再生コスト； 製品全体がマテリアルリサイクルされるとして、再生単価を  $\beta_j$  で表すと、

$$C_{RC} = W \times \beta_j = \sum_{i=1}^n \rho_j S_i l_i \times \beta_j = \rho_j \beta_j \times \sum_{i=1}^n l_i d_i^2$$

- 7) 全リサイクルコスト； 回収コスト+解体コスト+再生コスト とする。

$$C_{TRC} = C_{CI} + C_{DC} + C_{RC} \quad (7.16)$$

$$\text{ここで、解体コストは、 } C_{DC} = \sum_{i=1}^{N_{DC}} C_{dci} = \overline{C_{dc}} \times N_{DC}$$

( $N_{DC}$ ：解体数， $\overline{C_{dc}}$ ：平均解体コスト)

一方、製品性能としては、部材 3 の先端に外力を加える場合の静コンプライアンスを考慮ことにすると、カスチリアーノの定理より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{\delta}{F} = \frac{1}{3} \frac{l_1^3 - 3l_1^2 l_3 + 3l_1 l_3^2 - l_3^3}{EI_1} + \frac{l_2 l_3^2}{EI_2} + \frac{1}{3} \frac{l_3^3}{EI_3} \\ &= \frac{1}{3} \frac{(l_1 - l_3)^3}{EI_1} + \frac{l_2 l_3^2}{EI_2} + \frac{1}{3} \frac{l_3^3}{EI_3} = \frac{1}{250E} \times \left( \frac{125}{d_1^4} + \frac{12}{d_2^4} + \frac{8}{d_3^4} \right) \end{aligned} \quad (7.17)$$

### 7.4.3 4 タイプの製品に対する解析結果と考察

以上の前提において、各製品のタイプについて製品性能とライフサイクルコストを目的関数としてパレート最適解を求めた。最適化計算については、多目的最適化の手法としては従来いくつかの方法が提案されているが<sup>(18)(19)</sup>、本章では、非線形問題に対して効率の高いアルゴリズムといわれている Normal-Boundary Intersection Method (NBI 法)<sup>(20)</sup>を使用した。解析の結果を以下に示す。

#### (1) 製品 A のケース

内容積一定の制約条件（内容積=500cm<sup>3</sup>）において、製品性能（座屈応力）の最大化とライフサイクルコスト  $C_{LC1}$  の最小化を目的にパレート最適解を求めた。その場合のパレート最適解，内容積の値および各設計変数の最適値を図 7-4 と図 7-5 に示す。

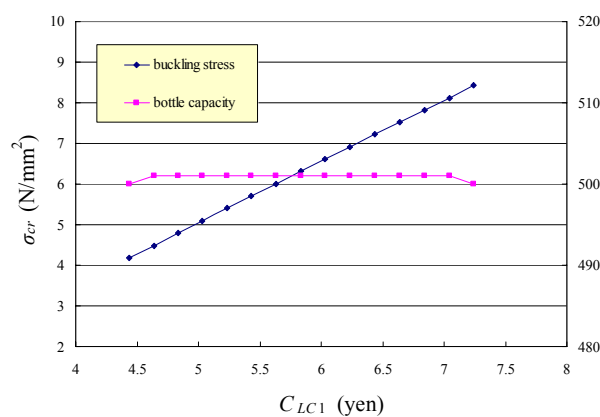


Fig. 7-4 Relation between critical buckling stress and lifecycle cost for reduce

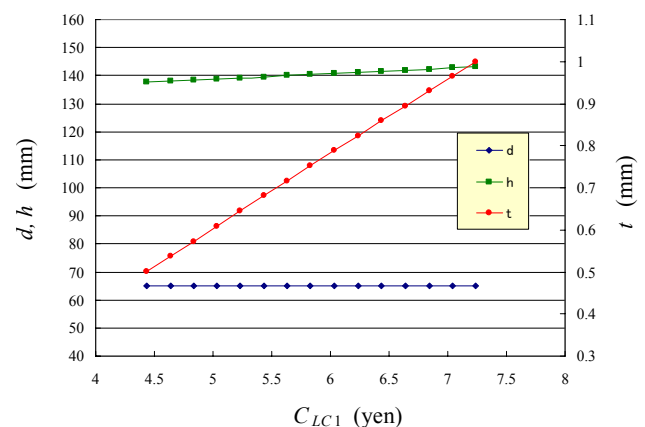
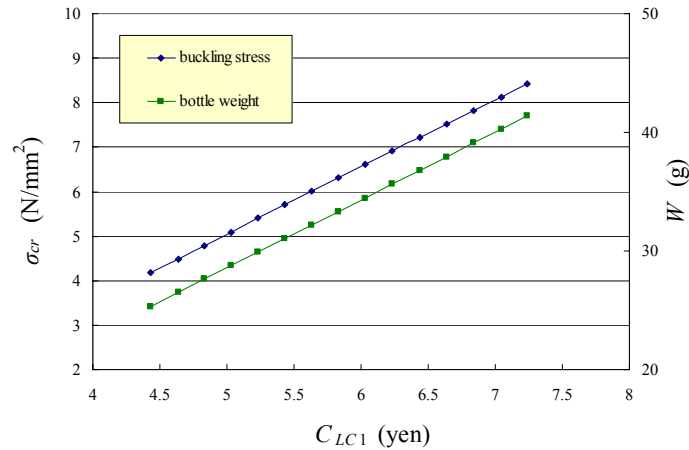


Fig. 7-5 Design variables of Pareto optimum solutions in the case of reduce

図 7-4 より，ライフサイクルコスト  $C_{LC1}$  と座屈応力  $\sigma_{cr}$  の関係は， $\sigma_{cr}$  を増そうとすると  $C_{LC1}$  が増加するパレート解となっているが，ボトルの内容積を一定値に固定したことにより，図 7-5 に示すように，肉厚  $t$  が増加するにつれて高さ  $h$  が僅かに増加している。しかし座屈応力の式(7.11)から分かるように， $h$  の増加は座屈応力には影響を及ぼさず，ボトルの体積を増加させることによってライフサイクルコストを増加させるのみである。また，ボトルの外形寸法  $d$  は下限値のままである。

パレート最適解におけるボトル重量の変化を図 7-6 に示す。ボトルの重量は，座屈応力と全く同じような傾向を示し，ライフサイクルコストと比例関係にある。



**Fig. 7-6** Relation among critical buckling stress, lifecycle cost and bottle weight for reduce

## (2) 製品 B のケース

次に再使用を行う製品 B の場合を考える．再使用のコストは，7.4.1 節，3)項の式(7.8)で定義しているので，ここで清掃単価  $c_1$  を決める必要がある．清掃単価  $c_1$  の決め方としては，ボトルの 1 回当りの清掃費が，ボトルの製造費の約 1/3 になるように設定した．すなわち， $38123 \text{ mm}^2$  の内表面積の場合に，清掃コストが約 1.5 円であると設定すると，

$$c_1 = 4.0 \times 10^{-5} [\text{yen/mm}^2] = 40 [\text{yen/m}^2] \quad \text{となる.}$$

再使用を行うためのケースとしては，次の場合が考えられる．

**Case 1**：ボトルの肉厚の下限值を設定し，数回の再使用を行う．

**Case 2**：ケース 1 に加えて，ボトル内面にコーティングを行い，内面の清掃を容易にする（清掃単価を低減する）とともに，傷を付きにくくして再使用の回数を増やす．

但し，この場合はコーティング費用が必要となるため，製造費用の増加を考慮する必要がある．

以下では，総合としての **Case 2** の内面コーティングの場合について述べる．

- ボトルの肉厚  $t$  の下限値は  $0.70\text{mm}$  とする．
- コーティングを実施することによって，清掃単価はコーティング無しの場合の 1/3 になると仮定する．従って，

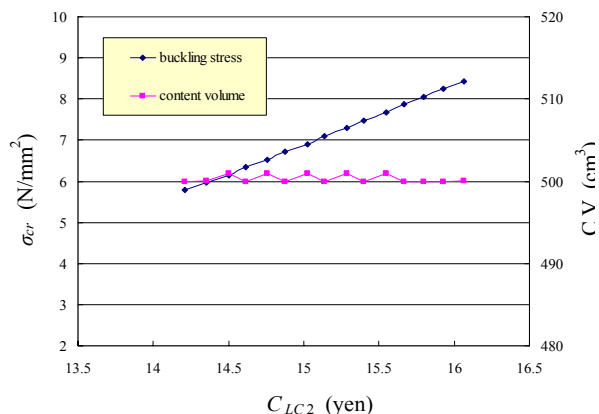
$$c_1 = 1.3 \times 10^{-5} [\text{yen/mm}^2] = 13 [\text{yen/m}^2]$$

- コーティングの実施によって再使用回数は，10 回まで可能になると考える．
- コーティングの実施費用は，内面の表面積にコーティング単価  $\gamma$  を掛けて算出する．そして，コーティング単価は，ボトルの材料コストを考慮して以下のように設定する．

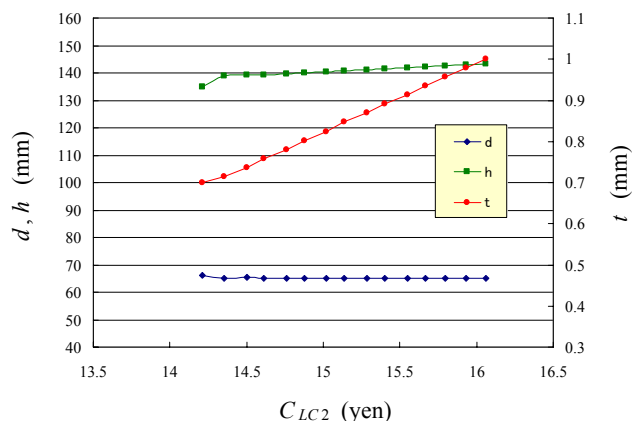
$$\gamma = 1.0 \times 10^{-4} [\text{yen/mm}^2] = 100 [\text{yen/m}^2]$$

以上の前提において，製品性能とライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  の最適化解析を行った．その結果を図 7-7，図 7-8 に示す．これらの図における  $C_{LC2}$  の値は，再使用の 10 回を含み，

最初の製造分からの使用を含めるとトータル 11 回分のコストとなっている。

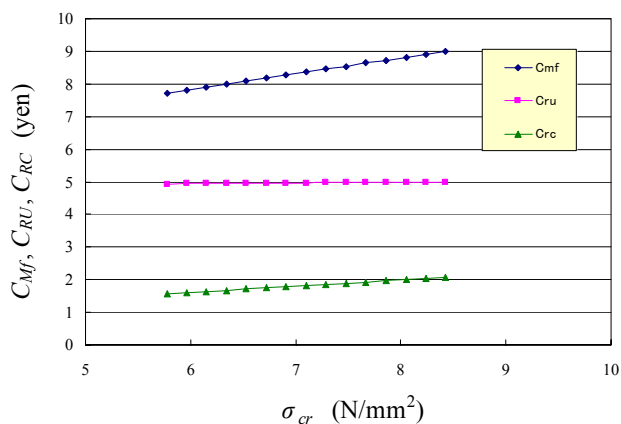


**Fig. 7-7** Relation between critical buckling stress and lifecycle cost for reuse (10 times with inner coating)



**Fig. 7-8** Design variables of Pareto optimum solutions in the case of reuse (10 times with inner coating)

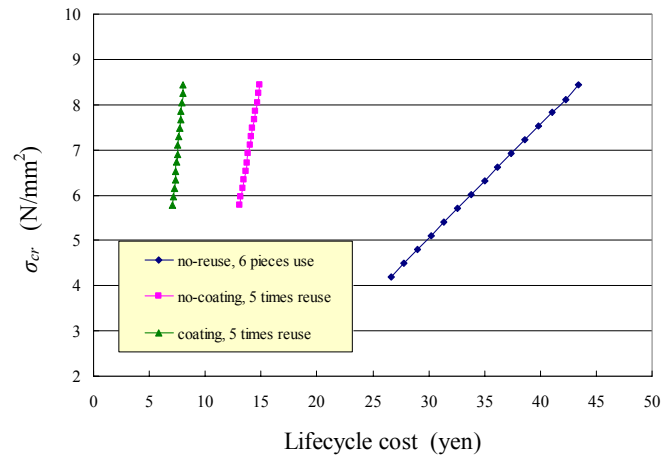
ライフサイクルコスト  $C_{LC2}$  の内訳を図 7-9 に示す。製造コストと再生コストは 1 回分であるが、製造コストはコーティングを実施したことによりコーティングをしない場合の約 2 倍の大きさになっている。



**Fig. 7-9** Components of lifecycle cost in the case of reuse (10 times with inner coating)

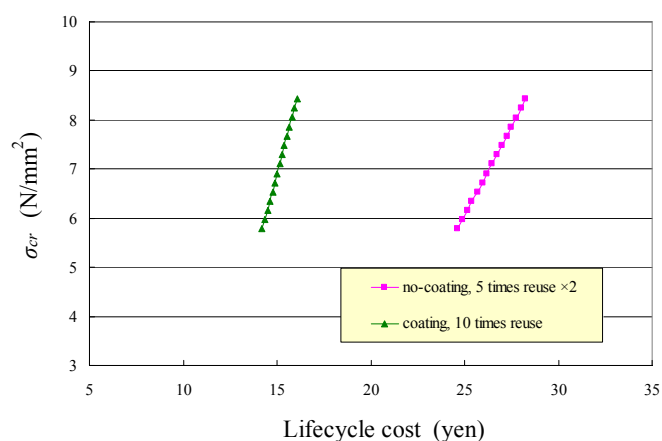
次に、コーティングをしていない再使用 5 回のケースとコーティングを実施した再使用 10 回のケースのライフサイクルコストを比較するために、トータル使用回数を 6 回にした条件でのライフサイクルコストを算出して比較した。この場合、再使用 10 回のコーティング有りのケースではまだ残り 5 回の再使用ができるため、製造コストと再生コストは、1/2 だけを織り込んだ。すなわち、ライフサイクルコストは再使用を 10 回行った場合の 1/2 に等しくなる。また、再使用の効果を見るため、再使用を行わない場合（製品 A のケース：

reduce) のコストも合わせて記載した。この場合のライフサイクルコストは、使用 6 回分の製造コストと再生コストを合わせたものとなる。その結果を図 7-10 に示す。これより、reduce に比べて reuse の場合のライフサイクルコストのメリットが理解される。



**Fig. 7-10** Comparison of lifecycle costs for reduce and two cases of reuse

また、再使用を 10 回行った場合のコーティングの実施有無によるライフサイクルコストの比較を、図 7-11 に示す。この場合、再使用 5 回のコーティング無しの場合のライフサイクルコストは、製造コストと再生コストを 2 回分計上し、トータルの使用回数を 11 回に合わせるため、再使用コストは 9 回分のコストをとっている。この図より、ボトルの内面コーティングにより製造コストはほぼ 2 倍に増加するが、1 回当りの再使用コストの低減と再使用回数の増加による再生コスト負担の軽減により、コーティングを行った場合は、コーティング無しの場合に比べてライフサイクルコストが低減できていることが分かる。



**Fig. 7-11** Comparison of lifecycle costs between no-coating and coating cases of reuse

### (3) 製品 C のケース

解析の前提として製品の機能寿命  $L_F$  を 3 年とし、製品を 9 年間使用する場合を考えて、部品は最大 2 回のリユースを行うと仮定する。

ライフサイクル各コストの定式化を行うために、式(7.12)から式(7.15)に関する定数を以下のように設定する。

- ・材料； 普通鋼とする． $E=2.10 \times 10^5$  MPa,  $\rho=7870$  kg/m<sup>3</sup>,  $\sigma_B=350$  MPa,  $\alpha=40$  yen/kg,  $\beta=20$  yen/kg
- ・加工単価；  $U_u=1.34 \times 10^5$  yen/m<sup>2</sup> at  $R_{max}=6\mu\text{m}$
- ・修理費単価；  $r=5,000$  yen, メンテナンスコストの係数；  $k=1.03 \times 10^{-5}$  [year/N]  
 $k$  の値については、 $d_i$  値が変化した時に、製品の耐用寿命  $L_p$  が製品の機能寿命  $L_F$  以下にならないように設定した。  
すなわち、製品の耐用寿命が最小になるのは  $d_i$  値が  $\min(0.05\text{m})$  になる場合で、その時の耐用寿命を 3 年とおくと、材料が普通鋼の場合、 $k$  の値は、 $k=1.03 \times 10^{-5}$  [year/N] となる。
- ・部品整備単価； 製品 1 回の整備費が、製造コストの約 1/6 になるように設定した。  
すなわち、 $c_1=1.0 \times 10^4$  [yen/m<sup>2</sup>]

この時各コストの表現は、式(7.12)～(7.15)より次の通りとなる。単位はいずれも、[yen]。

$$\text{・ 製造コスト } C_{Mf} = 3.148 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^4 + 2.68 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5 \quad (7.18)$$

- ・使用コストは、 $V=1$  [m/s],  $L=2$  [m],  $\mu_d=0.15$ ,  $E_{uc}=15$  [yen/kWh]  $=4.17 \times 10^{-6}$  [yen/Joule] と仮定し、 $T=9$  [年], および  $\rho=7870$  [kg/m<sup>3</sup>] と部材長さ  $l_i$  の値を代入すると、

$$C_U = 15.8 T \rho \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) = 1.12 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^6 \quad (7.19)$$

- ・メンテナンスコストは、式(7.14)に  $r, T, k, \sigma_B$  の値を代入して、

$$C_{Mt} = 12.5 \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right) \quad (7.20)$$

- ・再使用コストは、簡単のため全ての部材を再使用すると仮定すると、分解がある場合となるため式(7.15)を適用する。さらに、結合部の分解単価係数  $b_1$  を決めるために、結合部の分解費は、結合部の加工費の 1/5 であると仮定する。すなわち、

$$C_{DA} = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_1 d_i^2 = \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^n 2U_u d_i^2$$

今、分解すべき部材の数は、 $N_{da}=n=3$  だから、上式より  $d_i$  の値に拘わらず、 $b_1=2U_u/5=5.36 \times 10^4$  [yen/m<sup>2</sup>] (一定値) となる。

以上より、使用期間 9 年における再使用コストは、分解費と部品整備費の和に再使用回数を掛けることにより、次式のように表される。

$$C_{RU} = \left( \frac{T}{L_F} - 1 \right) \times \sum_{i=1}^{N_{da}} (b_i d_i^2 + c_{l_i} d_i) \quad (7.21)$$

$$= 2 \times \left\{ 5.36 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) + 0.1 \times (7d_1 + 5d_2 + 2d_3) \right\} \times 10^4$$

・リサイクルコスト  $C_{RC} = W \times \beta_j = 1.574 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^4 \quad (7.22)$

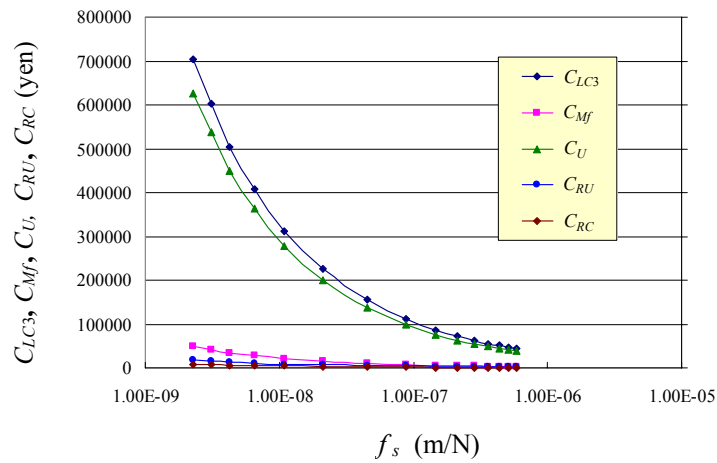
ここでは、リサイクルコストとして解体費は考慮せず、再生コストのみを考えた。

以上で、製造コスト、使用コスト、再使用コスト、再生コストは全て、最適化の方向が設計変数に関して同じであるが、メンテナンスコストの定式は、静コンプライアンスの式(7.17)と同様であるためパレート解とはならない。従ってメンテナンスコストを除くこれらのコストの和をライフサイクルコストと考える。すなわち、ライフサイクルコストとしては、次式の  $C_{LC3}$  を定義する。

$$C_{LC3} = C_{Mf} + C_U + C_{RU} + C_{RC}$$

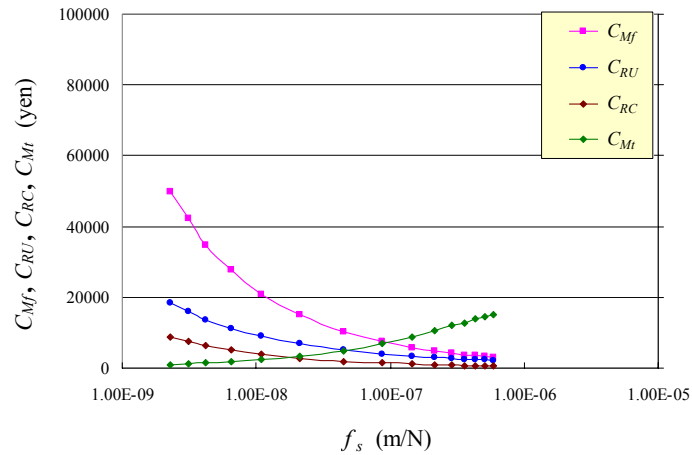
$$= 1.167 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^6 + 3.752 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5 + 2 \times (7d_1 + 5d_2 + 2d_3) \times 10^3 \quad (7.23)$$

以上の定式を用いて、静コンプライアンスと  $C_{LC3}$  のパレート最適解を求めた結果を図 7-12 に示す。なお、この図には構成要素である各段階のコストも合わせて表示したが、使用コストが大部分を占めていることが良く分かる。さらに目盛りを小さくし、製造コスト、再使用コスト、再生コストを取り出して静コンプライアンスとの関係を図 7-13 に示した。なお、パレート最適解の設計変数値を用いてメンテナンスコストを計算して、この図中に表示した。メンテナンスコストは、これらの他のコストと逆の傾向で、静コンプライアンスとは比例関係にある。さらに、図 7-14 にパレート最適解における設計変数値を示したが、静コンプライアンスの最大および最小値は、設計変数の上下限值で得られている。

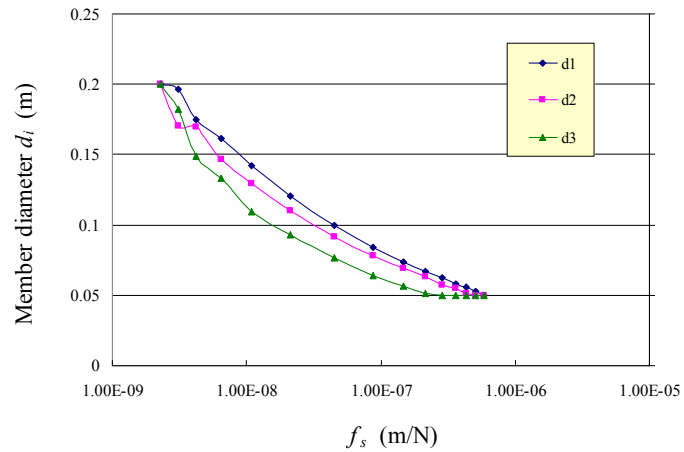


**Fig. 7-12** Relation between static compliance and lifecycle costs





**Fig. 7-13** Relation between static compliance and each lifecycle cost component (enlarged scale)



**Fig. 7-14** Design variables of Pareto optimum solutions in the case of product type C

#### (4) 製品 D のケース

検討のケースとして、製品の機能寿命  $L_F$  を 10 年とし、製品を 10 年間使用する場合を考えて、メンテナンス時には修理および部品への分解を行うと仮定する。

各コストの定式化を行うために、それらに関する定数を以下のように設定する。

- 材料および加工単価は製品 C のケースと同じとする。
- 修理費単価；  $r=5,000$  yen,  $k=2.14 \times 10^{-6}$  [year/N]

$k$  の値については、 $d_i$  が上限値 (0.20m) を取る時に、製品の耐用寿命  $L_p$  が機能寿命  $L_F$  (10 年) に等しくなるように設定した。すなわち、材料が普通鋼の場合、 $k = 2.14 \times 10^{-6}$  [year/N] となる。

- 使用期間は、長期使用で  $T=10$  [年]
- 部品整備単価は、製品 C のケースと同様、 $c_1 = 1.0 \times 10^4$  [yen/m<sup>2</sup>]

この時、各コストの表現は次の通りとなる．単位はいずれも，[yen]．

- ・ 製造コスト  $C_{Mf} = 3.148 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^4 + 2.68 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5$  (7.24)

- ・ 使用コストは、製品 C の場合と同様にして、 $T = 10$  [年]を代入すると、

$$C_U = 15.8 T \rho \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) = 1.24 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^6$$
 (7.25)

- ・ メンテナンスコストは、 $r, T, k, \sigma_B$  の値を代入すると、

$$C_{Mt} = 66.7 \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right)$$
 (7.26)

- ・ 次に 1 回当りの分解費  $C_{DA}$  については、製品 C の場合と同様に考えると、次式で表される．

$$C_{DA} = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_i = \sum_{i=1}^{N_{da}} b_i d_i^2$$
 (7.27)

ここで、 $b_1 = 2U_u/5 = 5.36 \times 10^4$  [yen/m<sup>2</sup>] である．

従って、使用期間 10 年における分解コストは、上式の分解費  $C_{DA}$  に製品の耐用寿命から決まる故障の回数を掛けて、以下のように求められる（これはメンテナンスコストで  $r$  の代わりに  $C_{DA}$  を代入したものである）．

$$\begin{aligned} C_{DA} &= \frac{b_1 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times T}{k \sigma_B} \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right) \\ &= 715.6 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right) \end{aligned}$$
 (7.28)

ここで、トータルのメンテナンス費として、 $C_{Mt}$  と  $C_{DA}$  の和を考え  $C_{TMt}$  [yen] で表すと、

$$C_{TMt} = C_{Mt} + C_{DA} = \left\{ 66.7 + 715.6 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \right\} \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right)$$
 (7.29)

- ・ 再生コスト  $C_{RC} = W \times \beta_j = 1.574 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^4$  (7.30)

以上の定式を用いて、ライフサイクルコストと静コンプライアンスの関係を調べた．

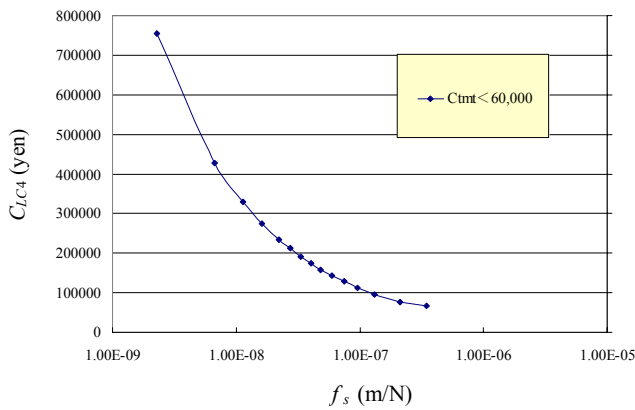
まず、新しい評価項目としてのトータルのメンテナンスコストと静コンプライアンスの関係を解析する． $C_{TMt}$  の要素である  $C_{Mt}$  と  $C_{DA}$  の関係を調べたが、パレート解にならなかった．計算の結果、両方を最小にする解は、 $d_i$  が上限値 (0.20m) を取る時である．従ってこれらは、静コンプライアンスと同じ方向にある目的関数となるので、他のライフサイクルコストと合計することはできない．そこで、次の 2 つのケースを検討した．

1) トータルのメンテナンスコストを制約条件として、静コンプライアンスとライフサイクルコストの最適化問題を設定しこれを解く．

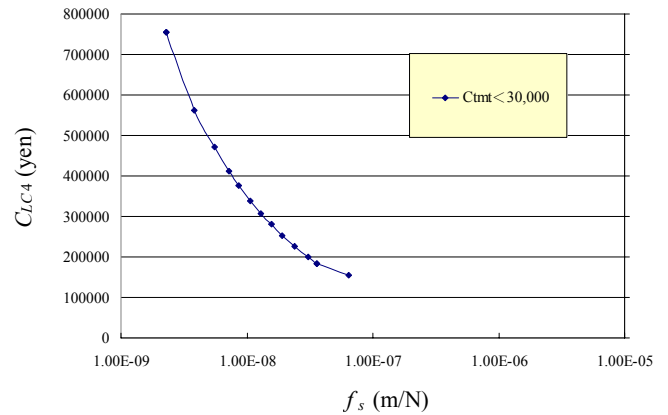
製造コスト，使用コスト，再生コストは全て，最適化の方向が設計変数に関して同じであるため，これらの和をライフサイクルコストと考え， $C_{LC4}$  と定義する．すなわち，

$$\begin{aligned} C_{LC4} &= C_{Mf} + C_U + C_{RC} \\ &= 1.287 \times (7d_1^2 + 5d_2^2 + 2d_3^2) \times 10^6 + 2.68 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2) \times 10^5 \end{aligned} \quad (7.31)$$

制約条件については，トータルのメンテナンスコスト  $C_{TMt}$  の最大値として，その取り得る値から判断して２段階設定し，60,000 円と 30,000 円を選ぶ．以上の条件で，静コンプライアンスとライフサイクルコスト  $C_{LC4}$  に関してパレート最適解を求めた．その結果を図 7-15 と図 7-16 に示す．



**Fig. 7-15** Relation between static compliance and lifecycle cost  $C_{LC4}$



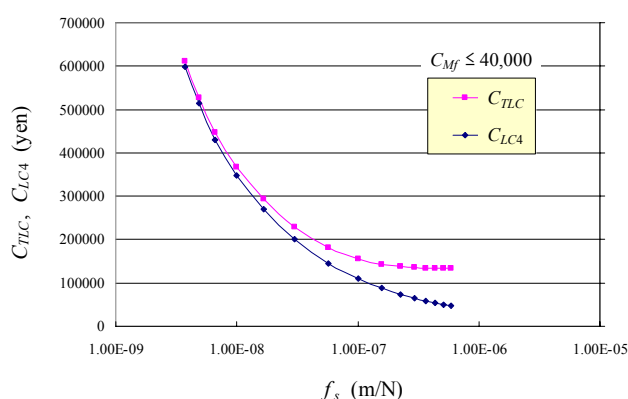
**Fig. 7-16** Relation between static compliance and lifecycle cost  $C_{LC4}$

メンテナンスコストの上限を制限するということは， $d_i$  を大きくすることになり，製造コストは上昇し，静コンプライアンスも大きい値の部分が除外され性能は望ましい方向に行く．その結果ライフサイクルコストの低い部分が現れず（ある値以下にはならず），静コンプライアンスを悪化させる方向の解は得られない．

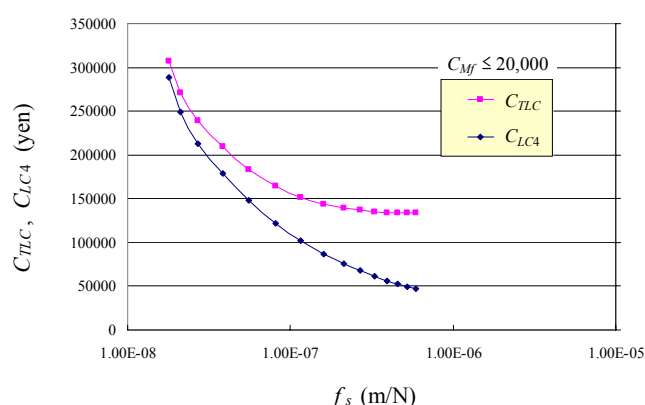
次に２番目のケースとして，

2) 製造コストを制約条件として，静コンプライアンスとライフサイクルコストの最適化問題を解く．

製造コストに制約条件を与えるのは，実際に製品を作るという観点からは分かりやすい．そこで，制約条件としては，製造コストの取り得る最大値 50,000 円から判断して，40,000 円，20,000 円の２段階を選び，これらについて計算した．図 7-17 と図 7-18 に製造コストを制約条件とした場合の，静コンプライアンスとライフサイクルコストのパレート最適解を示す．これらの図で， $C_{TLC}$  は  $C_{LC4}$  にトータルのメンテナンスコスト  $C_{TMt}$  を加えたトータルのライフサイクルコストを表している（すなわち， $C_{TLC} = C_{LC4} + C_{TMt}$ ）．この場合，最適化は静コンプライアンスと  $C_{LC4}$  を目的関数に行い， $C_{TLC}$  の値は， $C_{LC4}$  の最適解に  $C_{TMt}$  の計算値を加えて求めたものである．

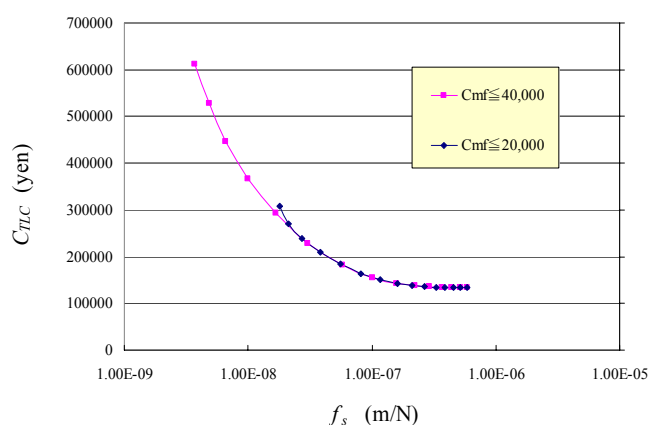


**Fig. 7-17** Relation between static compliance and lifecycle costs

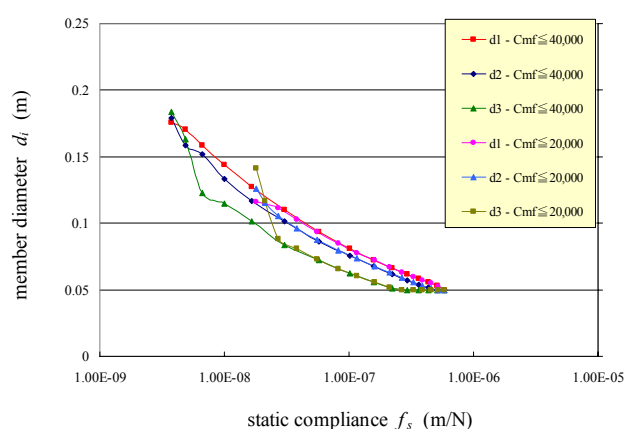


**Fig. 7-18** Relation between static compliance and lifecycle costs

製造コストの制約条件が異なる2つのパレート最適解をまとめて、静コンプライアンスとトータルライフサイクルコスト  $C_{TLC}$  の関係で表示したのが、図 7-19 である。またこれらの場合の設計変数の最適解を図 7-20 に示した。図 7-19 より、製造コストを制約することによって、静コンプライアンスの値のより小さい範囲、すなわちより優れた性能が得られなくなることが理解される。このことは設計変数で見れば図 7-20 より、製造コストを制限することにより部材寸法がより小さく抑えられ、静コンプライアンスの値を大きくしていると言うことができる。



**Fig. 7-19** Relation between static compliance and total lifecycle cost  $C_{TLC}$



**Fig. 7-20** Design variables of Pareto optimum solutions in the case of product type D

以上、今回分類を行った4種類の製品タイプについて、プラスチックボトルと一軸方向移動ロボットを適用例とした解析結果を述べてきたが、最後にまとめとして、再度これらの結果を整理して表 7-9 に示す。これらの知見は、種々のライフサイクル特性をもつ他の製品のライフサイクル設計を考える際に有益な指針となるとと思われる。

表 7-9 解析結果のまとめ

製品区分と 適用モデル	ライフサイクル特性	最適化の目的関数	主な結果
A プラスチック ボトル	使用期間 短 機能寿命 短 使用 1 回の使い捨て	1) 座屈応力 $\sigma_{cr}$ 2) ライフサイクルコスト ; $C_{LC1} = C_{Mf} + C_{RC}$	・座屈応力と $C_{LC1}$ のパレート最適解にもとづいて意思決定すればよい.
B プラスチック ボトル	使用期間 短 機能寿命 中程度 内面コーティングにより再使用回数向上 (10 回)	1) 座屈応力 $\sigma_{cr}$ 2) ライフサイクルコスト ; $C_{LC2} = C_{Mf} + C_{RU} + C_{RC}$	・再使用および再使用におけるコーティングの効果が定量的に把握できた.
C 移動ロボット	使用期間 9 年 機能寿命 3 年 部品は最大 2 回の再使用を行い、製品の分解と部品の整備コストを考慮する.	1) 静コンプライアンス $f_s$ 2) ライフサイクルコスト ; $C_{LC3} = C_{Mf} + C_U + C_{RU} + C_{RC}$ 但し, $C_{RU} = C_{DA} + C_{PM}$	・ $f_s$ と $C_{LC3}$ のパレート最適解にもとづいて意思決定すればよい. ・ $C_{LC3}$ のの中では, 使用コストの影響が特に大であった.
D 移動ロボット	使用期間 10 年 機能寿命 10 年  使用期間中のメンテナンス (分解と修理) を行う. 製品使用後の廃棄時には, リサイクルを行う.	1) 静コンプライアンス $f_s$ 2) ライフサイクルコスト ; $C_{LC4} = C_{Mf} + C_U + C_{RC}$ $\rightarrow C_{TLC} = C_{LC4} + C_{Mt} + C_{DA}$	・ $f_s$ と $C_{LC4}$ (または $C_{TLC}$ ) のパレート最適解にもとづいて意思決定すればよい. ・メンテナンスコストの低減は製品性能を向上させるが, 他のコストと競合する. ・製造コストの制限による静コンプライアンスの性能低下が把握できた.

## 7.5 結言

本章では、製品の機能寿命と使用期間により製品を4つのタイプに分類し、それらのライフサイクル設計に対する最適化手法を提案した。以下にその結果をまとめて示す。

- (1) ライフサイクル設計の最適化のために、3Rの考え方をを用いて **Reduce, Reuse, Recycle** の範疇毎に評価項目を整理し、それらの優先性を考慮して最適化する必要があることを示した。
- (2) 対象とする製品を「機能寿命」と「使用期間」に基づいて、4つのタイプに分類し、それぞれについてそのライフサイクル特性を考慮したライフサイクル設計のシナリオを設定するとともに、最適化の戦略を議論した。
- (3) 4つのシナリオに対して、具体的な設計手法を適用例で示すために、「プラスチックボトル」と簡単な「移動ロボット」をその対象に選んで、最適化解析を行った。解析の方法としては、それぞれの製品に対して代表的な「製品性能」と4つの製品タイプに「固有なライフサイクルコスト」を目的関数に選んで、二目的の最適化問題を設定し、パレート最適解を求めるというものである。
- (4) モデル化と最適化解析により、プラスチックボトルを **Reduce** 主体に考える場合と製品の **Reuse** を考える場合の違い、さらに **Reuse** の回数を増やした場合の設計についてその様子を定量的に示すことができた。  
また、使用期間が長いロボットの設計に関しては、機能寿命が来て部品の **Reuse** を行う場合と機能寿命が長い場合メンテナンスを実施して使用する場合について、分解費や部品整備費の定式化等により最適解の違いを定量的に明らかにすることができた。
- (5) 本研究で示した手法を適用することにより、設計者は種々のライフサイクル特性を有する製品に対して、最適なライフサイクルシナリオを設定し、ライフサイクルコストを考慮した最適設計を容易に行うことができると考えられる。

今後は、本手法を種々のライフサイクル特性をもつ他の製品にも適用して、その有効性を検証することが望まれる。

## 参考文献

- (1) Alting,L., Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises, *Concurrent Engineering*, (1993), pp.1-17, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) Sandberg,M., Boart,P. and Larsson,T., Functional Product Life-cycle Simulation Model for Cost Estimation in Conceptual Design of Jet Engine Components, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, **13**(4), (2005), pp.331-342.
- (3) Takai,S., A Lifecycle-Cost Model of Concept Testing, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2006-99605(2006).
- (4) Cheung,W.M., Newnes, L.B., Mileham,A.R., Marsh,R. and Lanham,J.D., A study of Life Cycle Costing in the Perspectives of Research and Commercial Application in the 21<sup>st</sup> Century, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, DETC2007-34425(2007).
- (5) Wang,L., Song,B., Li,X. and Ng,W.K., A Product Family Based Life Cycle Cost Model for Part Variety and Change Analysis, *International Conference on Engineering Design, ICED* (2007), 152.
- (6) 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコストの最適化手法, 日本機械学会誌, Vol.75, No.749(2009), pp.238-246.
- (7) 中上義幸, 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 長期間使用される機械製品の最適ライフサイクル設計法, 日本機械学会誌, Vol.74, No.748(2008-12), pp.3077-3087.
- (8) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Multiobjective Optimization Method for Lifecycle Design of Machine Products, DETC2008-49425, *Proceeding of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, New York, USA, DETC2008-49425(2008).
- (9) 梅田 靖, インバース・マニファクチャリング ハンドブック: インバース・マニファクチャリングフォーラム監修, 木村文彦ほか編, (2004), pp.35-60, 丸善.
- (10) 小林英樹, 製品ライフサイクルプランニングーISO/TR14062 の実践ー, (2003), pp.35-61, オーム社.
- (11) “Overview of 3R Policies”, Website of Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
- (12) 田中政資, 川井謙一, 小山 寛, プラスチックボトルの座屈解析, 塑性と加工, Vol.48, No.555(2007-4), pp.313-317.
- (13) 田中政資, 川井謙一, 小山 寛, プラスチックボトルの設計要因に関する影響度解析, 塑性と加工, Vol.48, No.555(2007-4), pp.328-333.
- (14) 田中政資, 川井謙一, 小山 寛, プラスチックボトルの最適設計, Transactions of JSCES, Paper No.20070005
- (15) 牛島邦晴, 春山繁之, 陳 玳 珩, 円筒の軸圧潰における初期ピーク応力の評価, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.70, No.700(2004-12), pp.1695-1702.
- (16) Timoshenko,S.P. and Gere,J.M., *Theory of Elastic Stability*, 2<sup>nd</sup> Ed., (1961), pp.457-468, McGraw-Hill Book Company, New York.

- (17) シーエムシー出版編集部, 2002 年 プラスチックリサイクル市場, (2002), pp.15-20, シーエムシー出版 (CMC Express).
- (18) Cohon,J.L., *Multiobjective Programming and Planning*, (1978), pp.98-127, Academic Press, New York.
- (19) 吉村允孝, 濱田年男, 由良憲二, 人見勝人, 機械構造システムの多目的最適設計 (工作機械主軸系の設計におけるパレート最適化), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.49, No.445(昭 58-9), pp.1606-1613.
- (20) Das,I. and Dennis,J.E., Normal Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems, *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, Vol.8, No.3(1998), pp.631-657.



## 第8章 結論

本研究では、製品のライフサイクルを考慮した主として機械製品の設計に関して、構想設計や基本設計のような設計の初期段階において、設計者の定量的な意思決定を支援することが出来る最適設計の手法を提案することを目的とした。従来のライフサイクル設計の研究では、ライフサイクルコストや製品性能などの評価項目に関する最適解を得るという視点からのアプローチが少なかった。ライフサイクル設計の問題は、多くの評価要因が絡む複雑な問題であり、競合する評価要因も多く、コンカレントエンジニアリングに基づく多目的最適化問題に対するアプローチが必要である。本研究では、特徴的ないくつかの製品を対象にモデル化を行い、評価項目としては主にライフサイクルにおける各種のコストと製品性能を取り上げて、それらに対する最適化手法を展開した。以下に各章の総括を述べる。

**第1章 緒論**では、研究の背景として現在の地球温暖化の問題について概説し、この対策としては循環型社会の実現が必要であること、およびそのためのモノづくりにおけるライフサイクル設計の重要性を説明した。さらにライフサイクル設計においては最適化の考え方が必要であり、この要請に応じるための本研究の目的を述べた。

**第2章 ライフサイクルを考慮した設計**では、循環型生産の実現に関わるライフサイクルエンジニアリングとライフサイクル設計について、その概要とライフサイクル設計の基本的な事項について述べた。また、本研究を進めるに当たって調査したこの分野における国内外の従来の研究について整理して概説した。

**第3章 コンカレントエンジニアリングと設計の最適化**では、製品設計におけるコンカレントエンジニアリングの重要性とコンカレントな最適化について概説するとともに、第4章以降のライフサイクル設計の最適化に必要な多目的最適化問題の取扱いと有効なアプローチの方法について説明した。

**第4章 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコストの最適化手法**では、家電製品のような消費エネルギー可変型の製品を想定して、トータルのライフサイクルコスト低減を定量的に検討するための解析用モデルを設定し、製造コスト、使用コスト、メンテナンスコストを用いてそれらの関係を吟味した。これらの各コストの定式化については、設計変数として、製品を構成する各部分の平均寿命としての耐用寿命と製品のエネルギー消費率を用いた。そして設計変数の制約条件のもとで、製品の使用期間を定めて、製造コストの最小化と、使用コストとメンテナンスコストの和の最小化を目的関数とする二目的最適化問題を設定しパレート最適解集合を求めた。設計パラメータとしての部品の耐用寿命に対する部品価格の係数や、修理作業単価を変化させたシミュレーションにより、パレート最適解が変化する様子を明らかにするとともに、各コストに及ぼす設計パラメータの影響を定量的に把握し、妥当な結果を得た。

**第5章 長期使用型製品のライフサイクルを考慮した最適システム設計手法**では、製品の使用段階における運転コストのウェイトが大きい工作機械を対象にして、製品性能とライフサイクルコストおよび環境影響を評価項目としたライフサイクル設計の最適設計法を提案した。まず、従来の製造段階のコストのみを考慮した設計解とライフサイクル要因として使用コストを含めた設計解との比較により、製品のライフサイクル段階を考慮することでライフサイクル全体として優れた設計解が得られることを定量的に明らかにした。また環境影響評価手法である Eco-indicator 99 を用いて環境影響の面からも製品設計案を評価した。今回の適用例では、環境影響はライフサイクルコストと競合しないため、ライフサイクルコストと同様な最適解が得られたが、環境影響の場合は使用段階の影響が非常に大きいことが判明した。さらに、離散的な設計変数の変更案として本体の材質と本体サイズを変更した場合を解析したが、これによりパレート最適解を改良するための材料の方向性や、加工品と本体サイズの最適な組合せに対する一つの方法論を提示することができた。

**第6章 機械製品のライフサイクル設計における3Rの視点からの最適化手法**では、ライフサイクルを考慮した機械製品の基本設計に関して、環境問題でよく言われる3Rの視点から、Reduce と Reuse を主目的とする2つの最適化戦略を提案した。そしてこの2つのパターンに対して、製品性能とそれぞれのパターンに特有なライフサイクルコストを目的関数とする最適化問題を構築するとともに、この問題を解くために使用する材料の最適化を含めた最適化の手順を提案した。本手法の妥当性を示すために、適用例として一軸方向に移動する簡単なロボットモデルを対象にして、製品性能としてはロボットの動作精度を選んで解析を行った。この結果、Reduce と Reuse 最適化の両パターンについて、動作精度とライフサイクルコストに関する特徴的なパレート最適解ならびに対応する設計変数の最適解が得られた。さらに、選定された材料の普通鋼とアルミ合金について、材料の特性値がライフサイクルコストに及ぼす影響を定量的に把握することができた。本章で示した解析手法を用いれば、ライフサイクルコストを考慮する中で所望の製品性能を決定することが可能となる。

**第7章 異なるライフサイクル特性をもつ製品に対するライフサイクル設計の最適化手法**では、ライフサイクル特性において重要な項目である製品の「機能寿命」と「使用期間」の長短により製品群を4つのタイプに分類して、それぞれについてそのライフサイクル特性を考慮したライフサイクルシナリオを設定し、各タイプに対するライフサイクル設計の最適化を行う方法を示した。また本提案手法の適用例として、「プラスチックボトル」と単純な「移動ロボット」を対象に、両製品の代表的な製品性能と各製品タイプに固有なライフサイクルコストを目的関数とする二目的最適化問題を設定して、各タイプの特徴を反映したパレート最適設計解を求めた。本章で示した考え方を適用することにより、設計者は種々のライフサイクル特性を有する製品に対して、最適なライフサイクルシナリオを設定し、ライフサイクルコストを考慮した最適設計を容易に行うことができる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，京都大学吉村允孝名誉教授には，永らく研究生活から離れていた小生を温かく研究室に迎えていただき，研究活動の終始に亘り懇切丁寧な御指導と絶えざる温かい励ましをいただきました．ここに深甚なる感謝の意を表します．

また，同学大学院西脇眞二教授には，温かい御支援と有益な御教示，御指導を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．同学大学院泉井一浩助教には，日々の温かい御支援と有益な御指導を頂きましたことを御礼申し上げます．そして，論文執筆にあたり御指導を頂きました **Jone.E. Goodman** 先生に御礼申し上げます．

さらに，本研究を遂行する中で，共に同じ課題で研究し議論を行った当時大学院修士課程の中上義幸様，また有益な議論を頂いた当時博士課程の **Ranjan Kumar** 博士に御礼申し上げます．また，日々の研究活動に対する御協力と親しく交流し有意義な研究生活を送らせていただきました最適システム設計工学研究室および生産システム工学研究室的の皆様，並びに色々な面でお世話をいただいた秘書の石塚裕美様に御礼申し上げます．

最後に，小生の我儘を許し3年間の研究生活において多大な協力と支援を続けてくれた妻視保に深く感謝いたします．

2009 年 5 月



## 研究業績出版物

### 投稿 Journal 論文

- (1) 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 消費エネルギー可変型製品の概念設計におけるライフサイクルコストの最適化手法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.749 (2009), pp.238-246.
- (2) 中上義幸, 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 長期間使用される機械製品の最適ライフサイクル設計法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.74, No.748 (2008), pp.3077-3087.
- (3) 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 機械製品のライフサイクル設計のための 3 R の視点にもとづく最適化手法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.756 (2009) の 8 月号に掲載が決定.
- (4) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Lifecycle Cost Optimization in the Conceptual Design of Products Having Variable Energy Consumption, *International Journal of Performability Engineering*, Vol.5, No.4, July 2009, pp.325-338.
- (5) Doi,K., Chujo,Y., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Construction of an Optimum System Design Method Considering Product Lifecycle, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol.2, Issue 3 (September 2009) に掲載が決定.
- (6) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Multiobjective Optimization Method for Lifecycle Design of Mechanical Products, *International Journal of Sustainable Engineering*, May, 2009, 投稿済.

### 国際会議 Proceedings (査読付)

- (1) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., A Study on Life-cycle Cost Optimization in the Conceptual Design of Products Incorporating Energy-saving Functions, *7<sup>th</sup> World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-7)*, Seoul, Korea, May 21-25, 2007.
- (2) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Application of Multiobjective Optimization Methods to Lifecycle Designs Considering the Reduce Paradigm, *5<sup>th</sup> China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM5)*, Jeju Island, Korea, June 16-19, 2008.
- (3) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Multiobjective Optimization Method for Lifecycle Design of Machine Products, *2008 ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, New York, USA, August 3-6, 2008.

- (4) Doi,K., Yoshimura,M., Nishiwaki,S. and Izui,K., Optimization Method for Lifecycle Designs of Products Having Different Lifecycle Characteristics, *8<sup>th</sup> World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-8)*, Lisbon, Portugal, June 1-5, 2009.

## 国内学会発表

- (1) 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 省エネ機能を有する製品の構想設計におけるライフサイクルコストの最適化解析, 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 旭川市ときわ市民ホール, September 2007, 精密工学会.
- (2) 中上義幸, 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 製品ライフサイクルを考慮した最適システム設計法の構築, 第 17 回設計工学・システム部門講演会, 仙台市戦災復興記念館, November 2007, 日本機械学会.
- (3) 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, 機械製品のライフサイクル設計のための 3 R の視点からの最適化手法, 第 18 回設計工学・システム部門講演会, 京大会館, September 2008, 日本機械学会.
- (4) 泉井一浩, 土井健志, 吉村允孝, 西脇眞二, 多目的最適化に基づく製品性能とライフサイクルコストのトレードオフ解析, SI 2008 システムインテグレーション部門講演会 長良川国際会議場, December 2008, 計測自動制御学会.